ANÁLISE TEMPORAL DA QUALIDADE DAS ÁGUAS DO MÉDIO PARAÍBA DO SUL

RICARDO PEREIRA ABRAÃO
NILO ANTONIO DE SOUZA SAMPAIO
CARIN VON MÜHLEN
JOSÉ GLENIO MEDEIROS DE BARROS
HUGO PIMENTEL TAVARES
THAÍS MENDES BARRAS
TIAGO FLORIANO FILHO
LAURA DUTRA DE ABREU
JOÃO VICTOR PANNO DAMASCENO
HEITHOR LIRA MACIEL

Editora Poisson

Ricardo Pereira Abraão
Nilo Antonio de Souza Sampaio
Carin von Mühlen
José Glenio Medeiros de Barros
Hugo Pimentel Tavares
Thaís Mendes Barras
Tiago Floriano Filho
Laura Dutra de Abreu
João Victor Panno Damasceno
Heithor Lira Maciel

Análise temporal da qualidade das águas do Médio Paraíba do Sul

1ª Edição

Belo Horizonte

Editora Poisson

2025

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial

Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
MSc. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
MSc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A159 ABRAÃO, Ricardo Pereira

Análise temporal da qualidade das águas do Médio Paraíba do Sul/ ABRAÃO, Ricardo Pereira; SAMPAIO, Nilo Antonio de Souza; MÜHLEN, Carin von; BARROS, José Glenio Medeiros de; TAVARES, Hugo Pimentel; BARRAS, Thaís Mendes; FILHO, Tiago Floriano; ABREU, Laura Dutra de; DAMASCENO, João Victor Panno; MACIEL, Heithor Lira - Belo Horizonte MG: Editora Poisson, 2025
95 p.

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-548-9
DOI: 10.36229/978-65-5866-548-9

Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Meio ambiente 2. Sustentabilidade. I. ABRAÃO, Ricardo Pereira; SAMPAIO II. Nilo Antonio de Souza III. MÜHLEN, Carin von IV. BARROS, José Glenio Medeiros de V. TAVARES, Hugo Pimentel VI. BARRAS, Thaís Mendes VII. FILHO, Tiago Floriano VIII. ABREU, Laura Dutra de IX. DAMASCENO, João Victor Panno X. MACIEL, Heithor Lira XI. Título

Sônia Márcia Soares de Moura – CRB 6/1896 CDD-333.72

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterado.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

Autores e Colaboradores

Ricardo Pereira Abraão (Autor Principal)

Mestre em Engenharia Ambiental - UERJ Universidade Estadual do Rio de Janeiro - UERJ

Prof. Dr. Nilo Antonio de Souza Sampaio (Orientador)

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

ORCID: 0000-0002-6168-785X

Profa. Dra. Carin von Mühlen (Coorientadora)

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

ORCID: 0000-0003-0876-1237

Profa. Dra. Laura Dutra de Abreu

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

ORCID: 0009-0004-5384-7827

Prof. Dr. José Glenio Medeiros de Barros

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

ORCID: 0000-0002-6902-599X

Hugo Pimentel Tavares

Universidade Federal Fluminense - UFF

ORCID: 0009-0008-8137-9054

Thaís Mendes Barras

ORCID: 0000-0003-4416-9169

Tiago Floriano Filho

Mestre em Engenharia Ambiental – UERJ. Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

ORCID: 0009-0002-5762-0342

João Victor Panno Damasceno

ORCID: 0009-0005-9565-8626

Heithor Lira Maciel

ORCID: 0009-0007-3731-2656

Sobre este livro:

Este livro apresenta uma análise abrangente da qualidade das águas do médio Paraíba do Sul no período de 2012 a 2022, utilizando uma abordagem interdisciplinar que combina técnicas estatísticas tradicionais com métodos modernos de inteligência artificial. O trabalho oferece contribuições significativas para a gestão de recursos hídricos e o monitoramento ambiental.

Instituições:

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) Universidade Federal Fluminense (UFF)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental Instituto Estadual do Ambiente (INEA)

©2025 Ricardo Pereira Abraão e colaboradores Todos os direitos reservados.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pelo sucesso desse Projeto, ao meu querido aluno Ricardo Pereira Abrãao por este trabalho com qualidade a Profa. Dra. Carin von Mühlen pela coorientação com toda dedicação e atenção e pela nossa parceria Duradoura, a minha amiga Profa. Dra. Laura Dutra de Abreu pelo apoio na Legislação Ambiental e ao meu amigo Prof. Dr. José Glenio Medeiros de Barros Pela Revisão Final e a todos que de alguma maneira contribuíram pelo sucesso desse trabalho.

Prof. Dr. Nilo Antonio de Souza Sampaio

SUMÁRIO

Agradecimentos 06

Resumo 16

Abstract 17

1. Referencial Teórico 18

1.1. Contexto Histórico do Rio Paraíba do Sul 18

1.1.1. Evolução Socioeconômica da Região 19

1.2. Poluição de Rios 20

1.2.1. Fontes de Poluição 20

1.2.2. Impactos da Poluição Hídrica 21

1.3. Análise Estatística dos Poluentes 21

1.3.1. Estatística Descritiva 21

1.3.2. Estatística Inferencial 22

1.3.3. Análise Multivariada 22

1.4. Inteligência Artificial em Monitoramento Ambiental 22

1.4.1. Redes Neurais Artificiais 22

1.4.2. Aplicações em Qualidade da Água 23

1.5. Despoluição de Rios 23

1.5.1. Estratégias de Despoluição 23

1.5.2. Instrumentos de Gestão 24

1.6. Índices de Qualidade da Água 24

1.6.1. Índice de Qualidade da Água NSF 24

1.6.2. Classificação da Qualidade 25

1.7. Legislação Ambiental Aplicável à Qualidade da Água 25

2. Método de Pesquisa 29

2.1. Classificação da Pesquisa 29

2.1.1. Quanto à Natureza 29

2.1.2. Quanto à Abordagem 29

2.1.3. Quanto aos Objetivos 29

2.1.4. Quanto aos Procedimentos 30

2.2. Fluxo Metodológico 30

2.2.1. Etapa 1 Definição do Tema, Questão de Pesquisa e Objetivos 30

SUMÁRIO

2.2.2. Etapa 2 Pesquisa Bibliométrica 30
2.2.3. Etapa 3 Referencial Teórico 31
2.2.4. Etapa 4 Seleção da Amostra 31
2.2.5. Etapa 5 Coleta de Dados 31
2.2.6. Etapa 6 Tratamento e Análise dos Dados 32
2.2.7. Etapa 7 Desenvolvimento do Modelo GRNN 32
2.2.8. Etapa 8 Validação e Análise dos Resultados 33
2.3. Ferramentas e Software Utilizados 33
2.3.1. Software Estatístico 33
2.3.2. Bibliotecas e Pacotes 33
2.4. Limitações da Pesquisa 33
2.5. Cronograma de Execução 34
2.6. Aspectos Éticos 34
2.7. Análise Preliminar dos Dados 35

3. Análise dos parâmetros que compõem a qualidade da água 40
3.1. Parâmetros de Qualidade da Água 40
3.1.1. Oxigênio Dissolvido (OD) 40
3.1.2. Coliformes Termotolerantes 41
3.1.3. Potencial Hidrogeniônico (pH) 41
3.1.4. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) 42
3.1.5. Nitrato (NO_3^-) 42
3.1.6. Fosfato Total 43
3.1.7. Temperatura 43
3.1.8. Turbidez 44
3.1.9. Sólidos Dissolvidos Totais 44
3.2. Metodologia de Cálculo do IQA 44
3.2.1. Histórico e Desenvolvimento 44
3.2.2. Parâmetros e Pesos do IQA NSF 45
3.2.3. Fórmula de Cálculo 45
3.2.4. Classificação da Qualidade 46
3.3. Caracterização dos Pontos de Estudo 46
3.3.1. Critérios de Seleção 46
3.3.2. Descrição dos Pontos de Monitoramento 46
3.3.3. Análise Comparativa dos Pontos 52

SUMÁRIO

4. Resultados e Discussões 53

4.1. Análise Temporal das Estações Secas e Chuvosas 53

4.1.1. Variabilidade Sazonal do IQA 53

4.1.2. Teste T Pareado 53

4.2. Análise Temporal do Índice da Qualidade da Água nos Nove Pontos Estudados 54

4.2.1. Ponto PS410 - Resende 54

4.2.2. Ponto PS413 - Resende 54

4.2.3. Ponto PS415 - Porto Real 55

4.2.4. Demais Pontos de Monitoramento 55

4.3. Análise Estatística Multivariada 55

4.3.1. Análise de Componentes Principais (PCA) 55

4.4. Análise de Variância (ANOVA) 60

4.4.1. ANOVA Unifatorial 61

4.4.2. Comparação Entre Pontos 61

4.5. Predição do Índice da Qualidade da Água 63

4.5.1. Implementação da Rede Neural GRNN 63

4.5.2. Resultados das Predições 63

4.5.3. Tendências Gerais das Predições 68

4.6. Validação dos Dados de 2023 com a Predição 68

4.6.1. Validação Individual por Ponto 68

4.6.2. Validação Comparativa em Grupos 73

4.6.3. Métricas de Performance 74

4.7. Discussão dos Resultados 75

4.7.1. Implicações dos Padrões Temporais 75

4.7.2. Eficácia do Modelo GRNN 75

4.7.3. Contribuições para a Gestão 75

5. Métricas e Validação 76

5.1. Fundamentos das Métricas de Avaliação 76

5.1.1. Erro Médio Absoluto (MAE) 76

5.1.2. Raiz do Erro Médio Quântico (RMSE) 77

5.1.3. Coeficiente de Determinação (R^2) 77

5.1.4. Erro Percentual Médio Absoluto (MAPE) 77

SUMÁRIO

5.2. Resultados das Métricas por Ponto de Monitoramento 78
5.2.1. Análise Individual dos Pontos 78
5.2.2. Ranking de Desempenho 79
5.3. Análise Comparativa da Métricas 79
5.3.1. Variabilidade entre Pontos 79
5.3.2. Correlação entre Métricas 80
5.4. Validação Cruzada 80
5.4.1. Metodologia da Validação Cruzada 80
5.4.2. Resultados da Validação Cruzada 80
5.5. Análise de Resíduos 81
5.5.1. Distribuição dos Resíduos 81
5.5.2. Resíduos vs Valores Preditos 81
5.6. Robustez do Modelo 81
5.6.1. Teste de Sensibilidade 81
5.6.2. Estabilidade Temporal 82
5.7. Comparação com Outros Modelos 82
5.8. Visualização das Métricas 82
5.9. Limitações e Considerações 83
5.9.1. Limitações Identificadas 83
5.9.2. Recomendações para Melhoria 84
5.10. Aplicabilidade Prática 84
5.10.1. Sistema de Alerta 84
5.10.2. Frequência de Atualização 84
5.11. Teste de Normalidade 84

6. Conclusão 85
6.1. Principais Achados 85
6.1.1. Impactos dos Eventos Climáticos Externos 85
6.1.2. Variabilidade Sazonal e Temporal 85
6.1.3. Impactos da Pandemia de COVID-19 86
6.2. Análise Estatística e Modelagem 86
6.2.1. Análise de Variância (ANOVA) 86
6.2.2. Modelo de Regressão Múltipla 86
6.2.3. Rede Neural de Regressão Múltipla 86

SUMÁRIO

6.3. Contribuições Científicas e Técnicas 87
6.3.1. Avanços Metodológicos 87
6.3.2. Contribuições para a Gestão Ambiental 87
6.3.3. Experiência Profissional Integrada 87
6.4. Análise de Fontes Difusas de Poluição 88
6.4.1. Influência de Atividades Agropecuárias 88
6.4.2. Implicações para o Planejamento 88
6.5. Alcance dos Objetivos 88
6.5.1. Objetivo Geral 88
6.5.2. Objetivos Específicos 88
6.6. Limitações do Estudo 89
6.6.1. Limitações Metodológicas 89
6.6.2. Limitações dos Modelos 89
6.7. Recomendações para Pesquisas Futuras 90
6.7.1. Extensões Metodológicas 90
6.7.2. Expansão do Escopo 90
6.7.3. Aplicações Práticas 90
6.8. Implicações para Políticas Públicas 90
6.8.1. Gestão dos Recursos Hídricos 90
6.8.2. Controle de Poluição 91
6.9. Contribuições para o Desenvolvimento Sustentável 91
6.9.1. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 91
6.9.2. Inovação e Tecnologia 91
6.10. Considerações Finais 91

Referências 93

LISTA DE FIGURAS

1.1. Estações de Monitoramento de Água Paraíba do Sul 19
1.2.Gráfico Estações Secas e Chuvosas no Período 2012-2022 20

2.1. Série temporal da água na região de Resende ponto 410 35
2.2. Série temporal da água na região de Resende ponto 413 35
2.3. Série temporal da água na região de Porto Real ponto 415 36
2.4. Série temporal da água na região de Barra Mansa ponto 418 36
2.5. Série temporal da água na região de Volta Redonda ponto 419 37
2.6. Série temporal da água na região de Volta Redonda ponto 421 37
2.7. Série temporal da água na região de Barra do Piraí ponto 423 38
2.8. Série temporal da água na região de Barra do Piraí ponto 425 38
2.9. Série temporal da água na região de Três Rios ponto 430 39

3.1. Imagem de Satélite PS410 47
3.2. Imagem de Satélite PS413 47
3.3. Imagem de Satélite PS415 48
3.4. Imagem de Satélite PS418 49
3.5. Imagem de Satélite PS419 49
3.6. Imagem de Satélite PS421 50
3.7. Imagem de Satélite PS423 51
3.8. Imagem de Satélite PS425 51
3.9. Imagem de Satélite PS430 52

LISTA DE FIGURAS

4.1. PCA Ponto 410 56
4.2. PCA Ponto 413 56
4.3. PCA Ponto 415 57
4.4. PCA Ponto 418 57
4.5. PCA Ponto 419 58
4.6. PCA Ponto 421 58
4.7. PCA Ponto 423 59
4.8. PCA Ponto 425 59
4.9. PCA Ponto 430 60
4.10. Gráfico dos Pontos Dispersos Utilizando ANOVA 61
4.11. Gráfico Violino dos 9 Pontos de Medição 62
4.12. Predição IQA Ponto 410 63
4.13. Predição IQA Ponto 413 64
4.14. Predição IQA Ponto 415 64
4.15. Predição IQA Ponto 418 65
4.16. Predição IQA Ponto 419 65
4.17. Predição IQA Ponto 421 66
4.18. Predição IQA Ponto 423 66
4.19. Predição IQA Ponto 425 67
4.20. Predição IQA Ponto 430 67
4.21. Validação da Qualidade da Água P-410 68
4.22. Validação da Qualidade da Água P-413 69
4.23. Validação da Qualidade da Água P-415 69
4.24. Validação da Qualidade da Água P-418 70
4.25. Validação da Qualidade da Água P-419 70
4.26. Validação da Qualidade da Água P-421 71
4.27. Validação da Qualidade da Água P-423 71
4.28. Validação da Qualidade da Água P-425 72
4.29. Validação da Qualidade da Água P-430 72
4.30. Gráfico dos Pontos P10, P13 e P15 Validados com a Predição 73
4.31. Gráfico dos Pontos P18, P19 e P21 Validados com a Predição 73
4.32. Gráfico dos Pontos P23, P25 e P30 Validados com a Predição 74

5.1. Métricas obtidas pela comparação de valores previstos e observados 83

LISTA DE QUADROS

1.1. Principais Marcos Legais Relacionados à Qualidade da Água no Brasil . . . 27

2.1. Cronograma de execução da pesquisa 34

3.1. Pesos das Variáveis do IQA NSF 45
3.2. Limites do Índice de Qualidade da Água - INEA 46

4.1. Resultados do Teste T pareado entre estações secas e chuvosas 54
4.2. Métricas de performance da validação com dados de 2023 74

5.1. Matriz de correlação entre métricas de avaliação 80
5.2. Resultados da validação cruzada por ponto de monitoramento 80
5.3. Análise de sensibilidade do modelo GRNN 81
5.4. Comparação de desempenho entre diferentes modelos 82
5.5. Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk 84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ANOVA Análise de Variância

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente

DBO Demanda Bioquímica de Oxigênio

GRNN Generalized Regression Neural Network (Rede Neural de Regressão Generalizada)

INEA Instituto Estadual do Ambiente

IQA Índice de Qualidade da Água

MAE Mean Absolute Error (Erro Médio Absoluto)

MAPE Mean Absolute Percentage Error (Erro Médio Absoluto Percentual)

NSF National Sanitation Foundation

OD Oxigênio Dissolvido

PCA Principal Component Analysis (Análise de Componentes Principais)

PNMA Política Nacional do Meio Ambiente

RMSE Root Mean Square Error (Raiz do Erro Quadrático Médio)

SDT Sólidos Dissolvidos Totais

UERJ Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Resumo: Este livro apresenta uma análise temporal abrangente da qualidade das águas do médio Paraíba do Sul no período de 2012 a 2022, desenvolvida por uma equipe interdisciplinar de pesquisadores e utilizando uma abordagem metodológica inovadora que integra técnicas estatísticas tradicionais com métodos modernos de inteligência artificial. O estudo analisa nove pontos de monitoramento distribuídos estrategicamente ao longo da bacia, investigando os padrões temporais e sazonais dos parâmetros de qualidade da água através de análises estatísticas multivariadas, incluindo ANOVA, teste T pareado e análise de componentes principais (PCA).

A pesquisa desenvolve e valida um modelo preditivo baseado em Redes Neurais de Regressão Generalizada (GRNN) para predição do Índice de Qualidade da Água (IQA), demonstrando superioridade em relação a métodos alternativos através de métricas rigorosas de validação. Os resultados revelam padrões sazonais significativos, com qualidade superior durante períodos secos, e quantificam os impactos de eventos climáticos extremos na qualidade hídrica.

As contribuições incluem o desenvolvimento de uma metodologia replicável para outras bacias hidrográficas, ferramentas práticas para gestão de recursos hídricos e diretrizes técnicas para otimização de sistemas de monitoramento ambiental. A verificação das premissas estatísticas através dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett reforça a robustez da abordagem adotada, oferecendo subsídios técnicos e científicos para políticas públicas e estratégias de monitoramento mais eficazes e sustentáveis.

O trabalho representa um esforço colaborativo entre diferentes áreas de especialização, combinando conhecimentos em engenharia ambiental, estatística, inteligência artificial e gestão de recursos hídricos, resultando em uma contribuição significativa para o estado da arte no monitoramento de qualidade de água em bacias hidrográficas brasileiras.

Palavras-chave: Qualidade da água. Paraíba do Sul. Análise temporal. Redes neurais. Monitoramento ambiental. GRNN. IQA. Trabalho colaborativo.

Abstract: This book presents a comprehensive temporal analysis of water quality in the middle Paraíba do Sul River for the period 2012-2022, developed by an interdisciplinary research team using an innovative methodological approach that integrates traditional statistical techniques with modern artificial intelligence methods. The study analyzes nine strategi- cally distributed monitoring points along the basin, investigating temporal and seasonal patterns of water quality parameters through multivariate statistical analyses, including ANOVA, paired T-test, and principal component analysis (PCA).

The research develops and validates a predictive model based on Generalized Regression Neural Networks (GRNN) for Water Quality Index (WQI) prediction, demonstrating superiority over alternative methods through rigorous validation metrics. Results reveal significant seasonal patterns, with superior quality during dry periods, and quantify the impacts of extreme climatic events on water quality.

Contributions include the development of a replicable methodology for other watersheds, practical tools for water resource management, and technical guidelines for opti- mizing environmental monitoring systems. Verification of statistical assumptions through Shapiro-Wilk and Bartlett tests reinforces the robustness of the adopted approach, pro- viding technical and scientific support for more effective and sustainable public policies and monitoring strategies.

The work represents a collaborative effort between different areas of specialization, combining knowledge in environmental engineering, statistics, artificial intelligence, and water resources management, resulting in a significant contribution to the state of the art in water quality monitoring in Brazilian watersheds.

Keywords: Water quality. Paraíba do Sul. Temporal analysis. Neural networks. Environmental monitoring. GRNN. WQI. Collaborative work.

CAPÍTULO

01 Referencial teórico

Esta seção tem como objetivo fornecer uma revisão abrangente dos conceitos fundamentais relacionados à qualidade da água e ao crescimento populacional. Para compreender como se relacionam esses dois aspectos importantes, é essencial estabelecer uma base sólida de conhecimento sobre os processos que governam a dinâmica dos sistemas aquáticos e os fatores que influenciam sua qualidade.

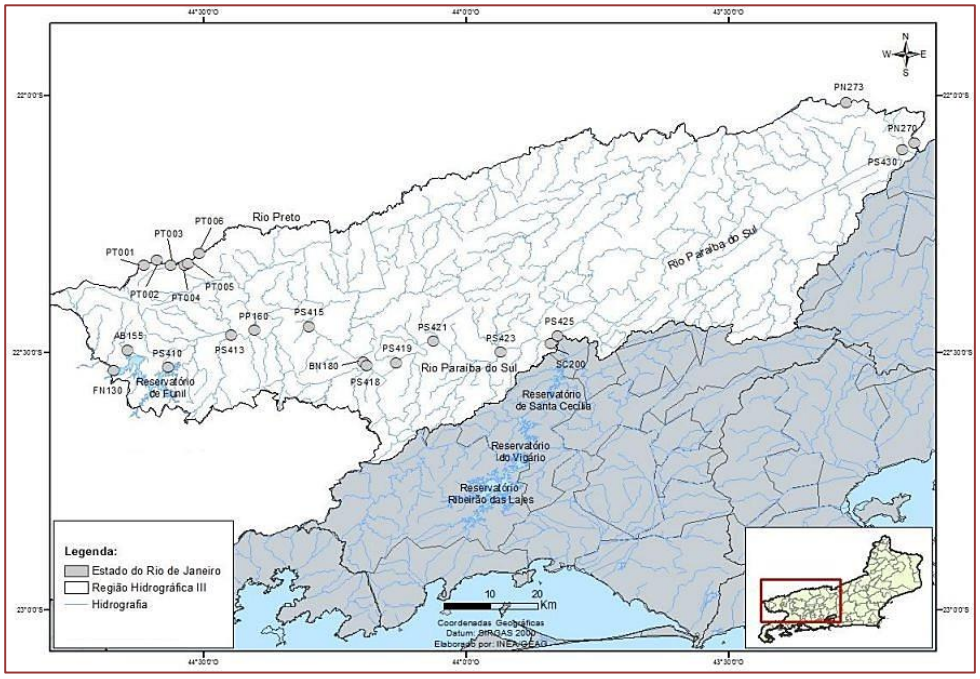
1.1. CONTEXTO HISTÓRICO DO RIO PARAÍBA DO SUL

O Rio Paraíba do Sul é um importante curso d'água localizado no sudeste do Brasil, abrangendo os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro. Sua história está intimamente ligada ao desenvolvimento econômico, social e ambiental da região ao longo dos séculos [1, 2]. Com uma extensão de aproximadamente 1.120 quilômetros, o rio nasce na Serra da Bocaina, no estado de São Paulo, e deságua no Oceano Atlântico, no norte do estado do Rio de Janeiro.

A bacia hidrográfica do Paraíba do Sul ocupa uma área de drenagem de cerca de 62.074 km^2, sendo considerada uma das mais importantes do país do ponto de vista socioeconômico. A região abriga aproximadamente 6 milhões de habitantes e concentra significativa atividade industrial, especialmente nos setores siderúrgico, petroquímico e automobilístico.

No contexto histórico, o Rio Paraíba do Sul desempenhou um papel fundamental na colonização e exploração do território brasileiro.

Figura 1.1: Estações de Monitoramento de Água Paraíba do Sul



Durante o período colonial, o rio serviu como rota de penetração e transporte de mercadorias, permitindo a expansão da atividade econômica nas áreas próximas às suas margens. A exploração do ouro e do café foram alguns dos principais impulsionadores do desenvolvimento nas regiões por onde o rio passa.

No século XIX, com o auge da produção cafeeira, o Rio Paraíba do Sul tornou-se ainda mais relevante, uma vez que suas águas foram utilizadas para irrigação das plantações e como meio de transporte para escoar a produção até os portos. A navegação fluvial foi um fator determinante para a integração e desenvolvimento das áreas ao longo do curso do rio.

1.1.1. EVOLUÇÃO SOCIOECONÔMICA DA REGIÃO

A evolução socioeconômica da bacia do Paraíba do Sul reflete as transformações mais amplas experimentadas pelo Brasil ao longo do século XX. A transição de uma economia agrícola para uma economia industrial urbanizada trouxe benefícios em termos de desenvolvimento econômico e melhoria das condições de vida, mas também gerou impactos ambientais significativos.

Além do aspecto econômico, o Rio Paraíba do Sul também desempenhou um papel estratégico em momentos históricos importantes. Durante a Guerra do Paraguai, por exemplo, o rio foi utilizado como via de transporte para o deslocamento de tropas e suprimentos militares. Sua localização geográfica e extensão permitiram que desempenhasse um papel logístico significativo na condução dos conflitos da época.

No entanto, ao longo dos anos, o Rio Paraíba do Sul também enfrentou desafios e problemas ambientais. A urbanização desordenada, o desmatamento, a

poluição industrial e o crescimento populacional desenfreado ao longo de suas margens levaram a uma degradação da qualidade da água e impactos negativos nos ecossistemas aquáticos.

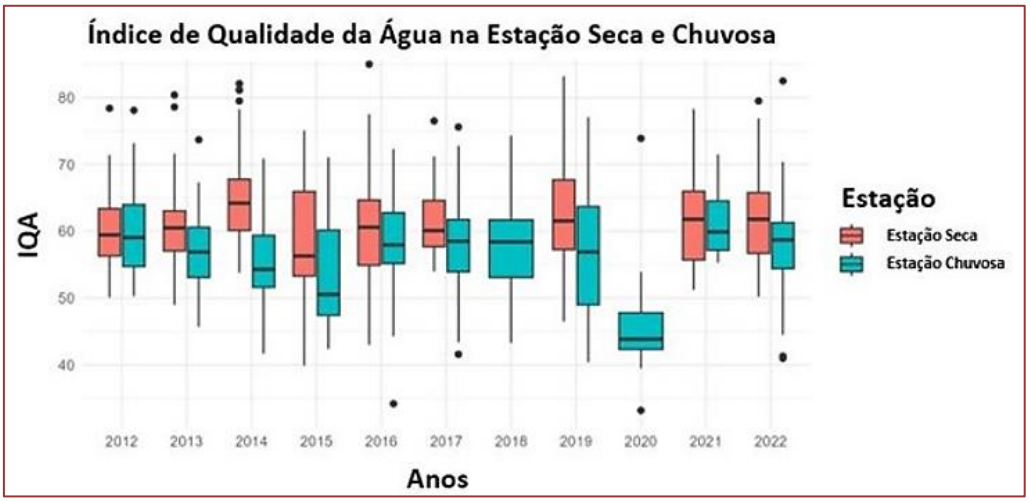
Hoje, o Rio Paraíba do Sul enfrenta desafios constantes relacionados à gestão dos recursos hídricos, à preservação ambiental e ao uso sustentável dos seus recursos. Ações de monitoramento, controle da poluição, recuperação de áreas degradadas e conscientização pública são importantes para garantir a preservação desse importante curso d'água e sua contribuição para o desenvolvimento regional.

O contexto histórico do Rio Paraíba do Sul reflete sua relevância econômica, social e ambiental ao longo dos séculos. Desde seu papel na colonização e exploração territorial até os desafios atuais de preservação ambiental, o rio desempenhou e continua desempenhando um papel central no desenvolvimento da região em que está inserido.

1.2. POLUIÇÃO DE RIOS

A poluição em recursos hídricos é um grave problema ambiental que afeta corpos d'água em todo o mundo. Consiste na introdução de substâncias nocivas, poluentes e resíduos em rios, córregos e outros cursos d'água, causando danos aos ecossistemas aquáticos e à saúde humana [3, 4]. Existem diversas fontes de poluição dos rios que podem ser classificadas em fontes pontuais e difusas.

Figura 1.2: Gráfico Estações Secas e Chuvosas no Período 2012-2022



1.2.1. FONTES DE POLUIÇÃO

Poluição Industrial

Uma das principais fontes de poluição é o despejo de resíduos industriais sem tratamento adequado. Indústrias de diferentes setores, como químicos, petroquímicos e metalúrgicos, muitas vezes liberam produtos químicos tóxicos, metais pesados e outros poluentes diretamente nos rios, contaminando a água e afetando a vida aquática.

Esgoto Doméstico

O esgoto doméstico é uma importante fonte de poluição dos rios. O lançamento de esgoto não tratado ou parcialmente tratado nos cursos d'água contamina a água com microrganismos patogênicos, nutrientes em excesso e substâncias químicas prejudiciais à saúde humana e aos ecossistemas aquáticos. Em muitas áreas urbanas e rurais, a infraestrutura de tratamento de esgoto é insuficiente, o que agrava ainda mais o problema.

Poluição Agrícola

A agricultura também contribui para a poluição dos rios. O uso intensivo de fertilizantes químicos e pesticidas nas lavouras resulta na lixiviação dessas substâncias para os cursos d'água. Os nutrientes em excesso, como nitrogênio e fósforo, causam a eutrofização, um fenômeno que leva ao crescimento excessivo de algas, prejudicando a qualidade da água e afetando a vida aquática.

Resíduos Sólidos

Outra forma de poluição dos rios é o descarte inadequado de resíduos sólidos. O lixo, incluindo plásticos, vidros, metais e outros materiais descartáveis, muitas vezes acaba nos rios por meio de sistemas de drenagem urbana ou de práticas inadequadas de disposição de lixo.

1.2.2. IMPACTOS DA POLUIÇÃO HÍDRICA

Os impactos da poluição de rios são amplos e afetam múltiplas dimensões:

- Saúde humana: Consumo de água contaminada pode causar doenças gastrointestinais, infecções e problemas de saúde a longo prazo
- Ecossistemas aquáticos: Morte de peixes, redução da biodiversidade e alteração das cadeias alimentares
- Economia: Impactos na pesca, turismo, agricultura irrigada e custos de tratamento de água
- Qualidade de vida: Degradação do ambiente urbano e rural, odores e aspectos visuais desagradáveis

1.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS POLUENTES

A análise estatística desempenha um papel fundamental na compreensão dos padrões de poluição e na avaliação da qualidade da água. A aplicação de técnicas estatísticas adequadas permite identificar tendências temporais, correlações entre variáveis e a significância de mudanças observadas nos parâmetros de qualidade da água.

1.3.1. ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A estatística descritiva fornece uma visão geral dos dados de qualidade da água, incluindo medidas de tendência central (média, mediana, moda) e medidas de dispersão (desvio padrão, variância, amplitude). Essas medidas são essenciais para

caracterizar o comportamento dos parâmetros de qualidade da água ao longo do tempo e entre diferentes pontos de monitoramento.

1.3.2. ESTATÍSTICA INFERENCIAL

A estatística inferencial permite fazer generalizações sobre populações com base em amostras e testar hipóteses sobre os dados. Técnicas como teste t, ANOVA e análise de regressão são comumente utilizadas para:

- Comparar médias entre diferentes períodos ou locais
- Identificar diferenças significativas entre grupos
- Avaliar correlações entre variáveis
- Desenvolver modelos preditivos

1.3.3. ANÁLISE MULTIVARIADA

A análise multivariada é particularmente útil para estudos de qualidade da água, pois permite examinar simultaneamente múltiplas variáveis e suas inter-relações. Técnicas como Análise de Componentes Principais (PCA), análise de cluster e análise discriminante ajudam a:

- Reduzir a dimensionalidade dos dados
- Identificar padrões ocultos
- Agrupar observações similares
- Classificar amostras de água

1.4. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM MONITORAMENTO AMBIENTAL

O uso de técnicas de inteligência artificial no monitoramento ambiental tem crescido significativamente nas últimas décadas, oferecendo ferramentas poderosas para análise de dados complexos e predição de cenários futuros [5, 6].

1.4.1. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

As redes neurais artificiais são sistemas computacionais inspirados no funcionamento do cérebro humano, capazes de aprender padrões complexos a partir de dados [7, 8]. No contexto do monitoramento da qualidade da água, as redes neurais podem ser utilizadas para:

- Predição de parâmetros de qualidade da água
- Classificação de amostras de água
- Detecção de anomalias
- Otimização de processos de tratamento

Redes Neurais de Regressão Generalizada (GRNN)

As Redes Neurais de Regressão Generalizada (GRNN) constituem uma classe especial de redes neurais feedforward que são particularmente adequadas para problemas de aproximação de funções e predição. Suas principais características incluem:

- Arquitetura simples com apenas uma camada oculta
- Treinamento rápido e estável
- Boa capacidade de generalização
- Robustez a ruídos nos dados
- Capacidade de trabalhar com dados limitados

1.4.2. APLICAÇÕES EM QUALIDADE DA ÁGUA

A aplicação de inteligência artificial em estudos de qualidade da água tem demonstrado resultados promissores em diversas áreas:

- Predição de IQA: Desenvolvimento de modelos para prever índices de qualidade da água
- Detecção precoce: Identificação antecipada de problemas de qualidade
- Otimização de monitoramento: Redução de custos através da otimização da frequência de coletas
- Suporte à decisão: Ferramentas para auxiliar gestores na tomada de decisões

1.5. DESPOLUIÇÃO DE RIOS

A despoluição de rios é um processo complexo que envolve múltiplas estratégias e tecnologias para remover ou reduzir os poluentes presentes nos corpos d'água. Este processo é fundamental para restaurar a qualidade da água e proteger os ecossistemas aquáticos.

1.5.1. ESTRATÉGIAS DE DESPOLUIÇÃO

Controle na Fonte

A estratégia mais eficaz de despoluição é o controle na fonte, que visa reduzir ou eliminar a entrada de poluentes nos corpos d'água:

- Implementação de sistemas de tratamento de efluentes industriais
- Construção e ampliação de estações de tratamento de esgoto
- Adoção de práticas agrícolas sustentáveis
- Gestão adequada de resíduos sólidos

Tratamento In-Situ

O tratamento in-situ envolve a aplicação de tecnologias diretamente no corpo d'água para remover ou neutralizar poluentes:

- Aeração artificial para aumentar os níveis de oxigênio dissolvido

- Uso de biorreatores para degradação de matéria orgânica
- Aplicação de coagulantes e floculantes para remoção de partículas
- Fitorremediação utilizando plantas aquáticas

1.5.2. INSTRUMENTOS DE GESTÃO

A despoluição eficaz de rios requer a implementação de instrumentos de gestão adequados:

Legislação e Normativas

O arcabouço legal brasileiro estabelece diretrizes importantes para a gestão da qualidade da água:

- Resolução CONAMA 357/2005: classificação dos corpos d'água e padrões de qualidade
- Lei 9.433/97: Política Nacional de Recursos Hídricos
- Instrumentos de outorga e cobrança pelo uso da água
- Sistemas de licenciamento ambiental

Monitoramento e Controle

O monitoramento contínuo é essencial para avaliar a eficácia das medidas de despoluição:

- Estabelecimento de redes de monitoramento
- Desenvolvimento de sistemas de alerta precoce
- Programas de educação ambiental
- Fortalecimento da fiscalização
- Instrumentos econômicos para incentivo à redução da poluição

1.6. ÍNDICES DE QUALIDADE DA ÁGUA

Os índices de qualidade da água são ferramentas fundamentais para avaliar e comunicar o estado dos recursos hídricos de forma simplificada e compreensível. Estes índices integram múltiplos parâmetros físicos, químicos e biológicos em um único valor numérico.

1.6.1. ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA NSF

O Índice de Qualidade da Água desenvolvido pela National Sanitation Foundation (NSF) é amplamente utilizado no Brasil e considera nove parâmetros:

- Oxigênio Dissolvido (OD)
- Coliformes Termotolerantes
- pH
- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

- Nitrato
- Fosfato Total
- Temperatura
- Turbidez
- Sólidos Totais

Cada parâmetro possui um peso específico na composição final do índice, refletindo sua importância relativa para a qualidade geral da água.

1.6.2. CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE

O IQA NSF classifica a qualidade da água em cinco categorias:

- Excelente: 91-100
- Boa: 71-90
- Regular: 51-70
- Ruim: 26-50
- Muito Ruim: 0-25

Esta classificação facilita a interpretação dos resultados por parte de gestores, tomadores de decisão e do público em geral.

1.7. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL APLICÁVEL À QUALIDADE DA ÁGUA

A análise técnica e científica dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos é fundamental para a avaliação da qualidade da água. No entanto, é imprescindível considerar o arcabouço jurídico que regula essa temática no Brasil [9]. A legislação ambiental brasileira estabelece diretrizes essenciais para a proteção dos recursos hídricos, constituindo um elemento crucial da governança da água.

A Constituição Federal de 1988 (CF/88) representa um marco fundamental na proteção jurídica das águas no país [10]. Em seus diversos dispositivos, a Carta Magna assegura tanto a preservação do meio ambiente quanto a promoção dos direitos humanos fundamentais, como o direito à vida, à saúde e à dignidade. Esses direitos sustentam a construção do Estatuto Jurídico das Águas, fundamentado em dois eixos interligados: a defesa dos recursos naturais e a efetivação dos direitos sociais. O acesso à água potável, ao saneamento básico e à gestão pública eficiente se manifesta como expressão concreta desses direitos constitucionais.

Nesse contexto, a Lei nº 9.433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos [11], é um marco paradigmático. Essa norma estabelece princípios para a gestão descentralizada, participativa e integrada das águas, criando instrumentos como o enquadramento dos corpos d'água, a outorga de direito de uso e os comitês de bacia hidrográfica. Seu objetivo central é assegurar o uso múltiplo e sustentável dos recursos hídricos, em consonância com a função socioambiental da água.

Outra legislação relevante é a Lei nº 6.938/1981, que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) [12]. Esta introduziu mecanismos fundamentais para o controle da poluição hídrica, como o licenciamento ambiental e a exigência de estudos de impacto ambiental (EIA/RIMA). A PNMA também estabelece a responsabilização do poluidor e compatibiliza o desenvolvimento econômico com a proteção ambiental.

A evolução normativa ainda traz outros marcos importantes. O Decreto nº 50.877/1961 foi pioneiro ao definir legalmente a poluição hídrica [13], e o Decreto-Lei nº 221/1967 reforçou essa perspectiva [14]. O Decreto nº 73.030/1973 expandiu a conceituação sobre poluição das águas, abordando aspectos técnicos relevantes [15].

A Lei nº 9.605/1998, conhecida como a Lei de Crimes Ambientais [16], introduziu importantes instrumentos de responsabilização penal por danos ao meio ambiente, incluindo condutas omissivas relacionadas à poluição hídrica, conforme previsto no artigo 54, §3º. Essa norma consolidou o princípio da precaução, prevendo punições mesmo na ausência de dano ambiental efetivo.

O Código das Águas (Decreto nº 24.643/1934) é considerado o primeiro diploma legal a regulamentar de forma sistemática o uso dos recursos hídricos no Brasil [17], especialmente em relação à geração de energia hidráulica e ao uso de águas públicas e privadas. No campo das políticas públicas, a Lei nº 11.445/2007 estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico [18], com metas de universalização do acesso à água e ao esgotamento sanitário. Complementarmente, a Lei nº 12.305/2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos [19], exigindo manejo ambientalmente adequado dos resíduos para prevenir a contaminação de corpos hídricos.

Destaca-se também a Resolução CONAMA nº 357/2005 [20], que estabelece a classificação dos corpos d'água em diferentes classes de uso (de 1 a 4) e define padrões para o lançamento de efluentes. Essa Resolução é crucial para a avaliação da qualidade da água, estabelecendo limites para parâmetros essenciais como oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), pH e coliformes termotolerantes.

No âmbito institucional, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), criada pela Lei nº 9.984/2000 e reorganizada pelo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020) [21, 22], atua como órgão regulador e gestor da política de recursos hídricos e saneamento, desempenhando um papel central na normatização e no incentivo à gestão integrada da água.

Na esfera internacional, o Brasil reafirma seu comprometimento com o desenvolvimento sustentável ao aderir à Agenda 2030 da ONU [23], especialmente ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável nº 6 (ODS 6), que visa assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos. A convergência entre os marcos legais internos e os compromissos globais reforça a relevância estratégica.

Tabela 1.1: Principais Marcos Legais Relacionados à Qualidade da Água no Brasil

Ano	Legislação/ Documento	Descrição
1934	Decreto nº 24.643	Código das Águas - primeiro diploma legal sistemático sobre recursos hídricos
1961	Decreto nº 50.877	Define legalmente a poluição hídrica, ser-indo como base para outras normas
1967	Decreto-Lei nº 221	Reforça a regulamentação sobre a poluição das águas
1973	Decreto nº 73.030	Expande a definição de poluição das águas e aborda aspectos técnicos relevantes
1981	Lei nº 6.938	Institui a Política Nacional do Meio Ambiente e introduz mecanismos para controle da poluição hídrica
1988	Constituição Federal (CF/88)	Estabelece a proteção do meio ambiente e direitos humanos, como o direito à água e saneamento
1997	Lei nº 9.433	Estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos, promovendo a gestão integrada das águas
1998	Lei nº 9.605	Lei de Crimes Ambientais que inclui penalizações por poluição hídrica, reforçando o princípio da precaução
2000	Lei nº 9.984	Cria a Agência Nacional de Águas (ANA), órgão regulador da política de recursos hídricos
2005	Resolução CONAMA nº 357	Classifica corpos d'água e estabelece padrões de qualidade e limites para lançamento de efluentes
2007	Lei nº 11.445	Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, visando à universalização do acesso à água
2010	Lei nº 12.305	Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, promovendo a gestão adequada dos resíduos para evitar a contaminação das águas
2015	Agenda 2030 da ONU	Compromissos globais para garantir a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento (ODS 6)
2020	Lei nº 14.026	Atualiza o marco legal do saneamento básico, ampliando diretrizes para gestão de água e esgoto

Em síntese, a legislação ambiental brasileira relacionada à qualidade da água reflete um esforço contínuo para integrar a proteção dos recursos hídricos com o desenvolvimento sustentável. O conjunto normativo que se constituiu ao longo das últimas décadas busca não apenas garantir a disponibilidade desse recurso vital, mas também assegurar que seu uso respeite os limites naturais e sociais, promovendo a justiça ambiental e a equidade no acesso à água. A implementação eficaz dessas legislações é essencial para enfrentar os desafios contemporâneos, como a escassez hídrica, a poluição e as mudanças climáticas, que exigem uma abordagem colaborativa e multidisciplinar na gestão das águas.

De forma derradeira, o fortalecimento das instituições responsáveis pela gestão dos recursos hídricos e a promoção da participação social são imperativos para a efetividade das políticas públicas. A conscientização da população sobre a importância da preservação e uso responsável da água, aliada a ações governamentais bem-estruturadas, pode contribuir significativamente para a melhoria da qualidade da água. Portanto, é fundamental que a sociedade civil, setores

produtivos e o governo atuem em parceria, a fim de criar um futuro sustentável em que todos tenham acesso a água limpa e segura, essencial para a vida e o bem-estar humano.

Este referencial teórico estabelece as bases conceituais necessárias para compreender a complexidade dos sistemas aquáticos e os desafios associados ao monitoramento e gestão da qualidade da água. A integração de conhecimentos das áreas de engenharia ambiental, estatística, inteligência artificial e legislação ambiental fornece o arcabouço teórico para o desenvolvimento das metodologias apresentadas nos capítulos subsequentes.

CAPÍTULO

02 Método de pesquisa

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada na pesquisa, expondo a classificação do estudo, o fluxo metodológico para o desenvolvimento da pesquisa e os procedimentos técnicos utilizados. Esta seção explica a sequência de passos utilizados para realização deste trabalho, bem como as bases em que foi planejado e executado, incluindo as fontes de dados utilizadas.

2.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa pode ser classificada sob diferentes perspectivas metodológicas, conforme descrito a seguir:

2.1.1. QUANTO À NATUREZA

Trata-se de uma pesquisa aplicada, pois visa gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos relacionados ao monitoramento e gestão da qualidade da água na bacia do Rio Paraíba do Sul. A pesquisa aplicada tem como objetivo principal resolver problemas práticos e imediatos, desenvolvendo soluções que possam ser implementadas para benefício da sociedade.

2.1.2. QUANTO À ABORDAGEM

A pesquisa adota uma abordagem quantitativa, baseada na análise estatística de dados numéricos de qualidade da água coletados ao longo de uma década. A utilização de métodos estatísticos e técnicas de inteligência artificial para análise e interpretação dos dados caracteriza claramente esta abordagem. Esta metodologia permite:

- Análise objetiva de dados numéricos
- Aplicação de técnicas estatísticas rigorosas
- Desenvolvimento de modelos preditivos
- Validação quantitativa dos resultados
- Generalização dos achados através de métricas estatísticas

2.1.3. QUANTO AOS OBJETIVOS

Do ponto de vista dos objetivos, esta pesquisa pode ser classificada como:

- Descritiva: Analisa e descreve as características e padrões de comportamento dos parâmetros de qualidade da água ao longo do tempo, caracterizando a variabilidade temporal e espacial dos dados.
- Exploratória: Busca identificar relações entre variáveis e fatores que influenciam a qualidade da água, explorando correlações e dependências não previamente conhecidas.
- Preditiva: Desenvolve modelos para previsão de cenários futuros de qualidade da água utilizando técnicas de inteligência artificial.

2.1.4. QUANTO AOS PROCEDIMENTOS

Os procedimentos metodológicos envolvem:

- Pesquisa documental: Análise de dados secundários provenientes do banco de dados do INEA (Instituto Estadual do Ambiente).
- Pesquisa bibliográfica: Revisão sistemática da literatura científica sobre qualidade da água e técnicas de inteligência artificial aplicadas ao monitoramento ambiental.
- Modelagem matemática: Desenvolvimento de modelos preditivos baseados em redes neurais artificiais, especificamente Redes Neurais de Regressão Generalizada (GRNN).

2.2. FLUXO METODOLÓGICO

O desenvolvimento desta pesquisa seguiu um fluxo metodológico estruturado em etapas sequenciais e interdependentes. Este fluxo garante a sistematização do processo investigativo e a replicabilidade da metodologia.

2.2.1. ETAPA 1: DEFINIÇÃO DO TEMA, QUESTÃO DE PESQUISA E OBJETIVOS

A primeira etapa envolveu a definição clara do tema de pesquisa, baseada na identificação da problemática da qualidade da água na bacia do Paraíba do Sul. Foram estabelecidos os objetivos geral e específicos, bem como a questão de pesquisa que norteia todo o desenvolvimento do trabalho.

Esta etapa incluiu:

- Revisão preliminar da literatura
- Identificação de lacunas no conhecimento
- Formulação da questão de pesquisa
- Definição dos objetivos geral e específicos
- Estabelecimento do escopo e delimitações do estudo

2.2.2. ETAPA 2: PESQUISA BIBLIOMÉTRICA

Foi realizada uma ampla pesquisa bibliométrica para identificar o estado da

arte nas áreas de qualidade da água, análise estatística e aplicação de redes neurais ao monitoramento ambiental. Esta etapa permitiu mapear as principais tendências de pesquisa e identificar lacunas no conhecimento.

A pesquisa bibliométrica envolveu:

- Busca sistemática em bases de dados científicas
- Análise de publicações dos últimos 15 anos
- Identificação de autores e instituições relevantes
- Mapeamento de tendências e metodologias emergentes
- Construção do referencial teórico

2.2.3. ETAPA 3: REFERENCIAL TEÓRICO

O desenvolvimento do referencial teórico baseou-se na revisão crítica da literatura, abordando os fundamentos teóricos necessários para compreender os fenômenos estudados e as metodologias aplicadas. Esta etapa estabeleceu as bases conceituais para o desenvolvimento da pesquisa.

2.2.4. ETAPA 4: SELEÇÃO DA AMOSTRA

A seleção dos pontos de monitoramento seguiu critérios específicos que garantem a representatividade e qualidade dos dados:

- Representatividade geográfica da bacia: Distribuição espacial adequada ao longo do médio Paraíba do Sul
- Disponibilidade de séries históricas consistentes: Dados contínuos para o período 2012-2022
- Relevância ambiental e socioeconômica: Pontos localizados em áreas de importância estratégica
- Diversidade de usos da água: Abastecimento público, industrial, recreação e preservação ambiental
- Qualidade dos dados: Ausência de lacunas significativas nas séries temporais

Foram selecionados nove pontos de monitoramento distribuídos ao longo do médio Paraíba do Sul, identificados pelos códigos: PS410, PS413, PS415, PS418, PS419, PS421, PS423, PS425 e PS430.

2.2.5. ETAPA 5: COLETA DE DADOS

Todos os dados foram coletados do banco de dados do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) [24, 25], uma fonte confiável e oficial de informações sobre a qualidade da água na região. O INEA mantém um programa de monitoramento sistemático desde a década de 1980, garantindo a consistência e qualidade dos dados.

Os dados coletados incluem:

- Parâmetros físico-químicos (pH, oxigênio dissolvido, DBO, turbidez, etc.)

- Parâmetros microbiológicos (coliformes termotolerantes)
- Parâmetros nutricionais (nitrato, fosfato)
- Parâmetros físicos (temperatura, sólidos dissolvidos totais)
- Índice de Qualidade da Água (IQA) calculado segundo metodologia NSF

2.2.6. ETAPA 6: TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

O tratamento dos dados foi realizado em múltiplas etapas:

Pré-processamento

- Verificação de consistência dos dados
- Identificação e tratamento de valores ausentes
- Detecção e tratamento de outliers
- Normalização e padronização quando necessário

Análise Estatística Descritiva

- Cálculo de medidas de tendência central e dispersão
- Análise de distribuições de frequência
- Caracterização temporal e sazonal dos dados

Análise Estatística Inferencial

- Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)
- Análise de variância (ANOVA)
- Teste T pareado para análise sazonal
- Análise de componentes principais (PCA)

2.2.7. ETAPA 7: DESENVOLVIMENTO DO MODELO GRNN

O desenvolvimento do modelo de Redes Neurais de Regressão Generalizada (GRNN) seguiu uma metodologia estruturada:

Preparação dos Dados

- Divisão dos dados em conjuntos de treinamento, validação e teste
- Normalização das variáveis de entrada
- Seleção das variáveis mais relevantes

Configuração do Modelo

- Definição da arquitetura da rede
- Otimização do parâmetro σ
- Configuração dos algoritmos de treinamento

Treinamento e Validação

- Treinamento da rede neural
- Validação cruzada
- Ajuste de hiperparâmetros
- Avaliação do desempenho

2.2.8. ETAPA 8: VALIDAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A validação dos modelos desenvolvidos utilizou múltiplas métricas estatísticas:

- Coeficiente de determinação (R^2)
- Erro médio absoluto (MAE)
- Raiz do erro quadrático médio (RMSE)
- Erro médio absoluto percentual (MAPE)
- Análise de resíduos

2.3. FERRAMENTAS E SOFTWARE UTILIZADOS

O desenvolvimento da pesquisa utilizou diversas ferramentas computacionais:

2.3.1. SOFTWARE ESTATÍSTICO

- R: Análises estatísticas, visualizações e modelagem
- Python: Desenvolvimento dos modelos de redes neurais
- MATLAB: Implementação da GRNN e análises avançadas

2.3.2. BIBLIOTECAS E PACOTES

- Tensorflow/Keras: Desenvolvimento de redes neurais
- Scikit-learn: Algoritmos de machine learning
- Pandas/NumPy: Manipulação e análise de dados
- Matplotlib/Seaborn: Visualização de dados

2.4. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Como toda pesquisa científica, este estudo apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados:

- Período de análise: O período de 2012-2022, embora significativo, pode não capturar tendências de longo prazo ou ciclos climáticos mais extensos.
- Variáveis não consideradas: Algumas variáveis potencialmente relevantes podem não ter sido incluídas na análise devido à disponibilidade de dados ou limitações metodológicas.

- Generalização espacial: Os resultados são específicos para os pontos de monitoramento selecionados e podem não ser diretamente generalizáveis para toda a bacia.
- Frequência de amostragem: A frequência mensal de coleta pode não capturar eventos de curta duração que impactem significativamente a qualidade da água.
- Fatores externos: Mudanças em políticas ambientais, eventos climáticos extremos ou alterações no uso do solo podem influenciar os resultados.

2.5. CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

A pesquisa foi desenvolvida ao longo de 24 meses, seguindo o cronograma apresentado no Quadro 3.1.

Tabela 2.1: Cronograma de execução da pesquisa

Etapas	Meses									
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20
Definição do tema e objetivos	X	X								
Pesquisa bibliométrica		X	X	X						
Referencial teórico			X	X	X					
Seleção da amostra				X	X					
Coleta de dados					X	X				
Tratamento de dados						X	X			
Desenvolvimento do modelo							X	X		
Análise e interpretação								X	X	
Validação dos resultados									X	X
Redação final										X

2.6. ASPECTOS ÉTICOS

Esta pesquisa utilizou exclusivamente dados secundários de domínio público, disponibilizados pelo INEA, não envolvendo coleta primária de dados ou experimentos com seres

humanos ou animais. Todos os dados utilizados são de acesso público e foram adequadamente citados e referenciados.

Os princípios éticos observados incluem:

- Uso responsável de dados públicos
- Citação adequada de todas as fontes
- Transparência metodológica
- Divulgação de limitações e incertezas
- Compromisso com a veracidade dos resultados

A metodologia apresentada neste capítulo fornece a base para o desenvolvimento rigoroso e sistemático da pesquisa, garantindo a confiabilidade e

validade dos resultados obtidos. As próximas seções apresentarão a aplicação prática desta metodologia e os resultados alcançados.

2.7. ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS

Como parte da metodologia, foi realizada uma análise preliminar das séries temporais dos nove pontos de monitoramento selecionados, apresentadas nas figuras a seguir:

Figura 2.1: Série temporal da água na região de Resende ponto 410

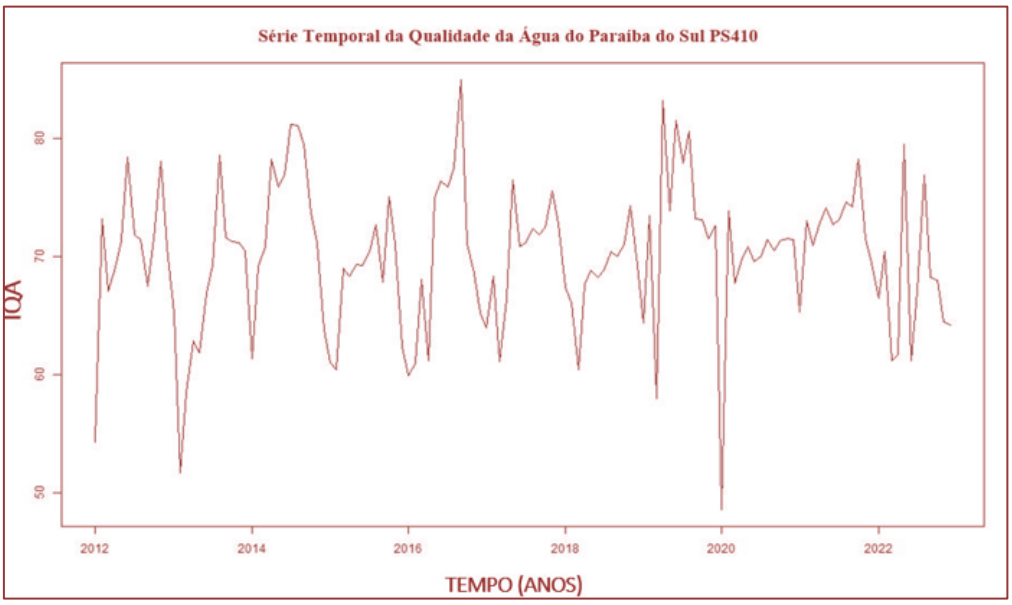


Figura 2.2: Série temporal da água na região de Resende ponto 413

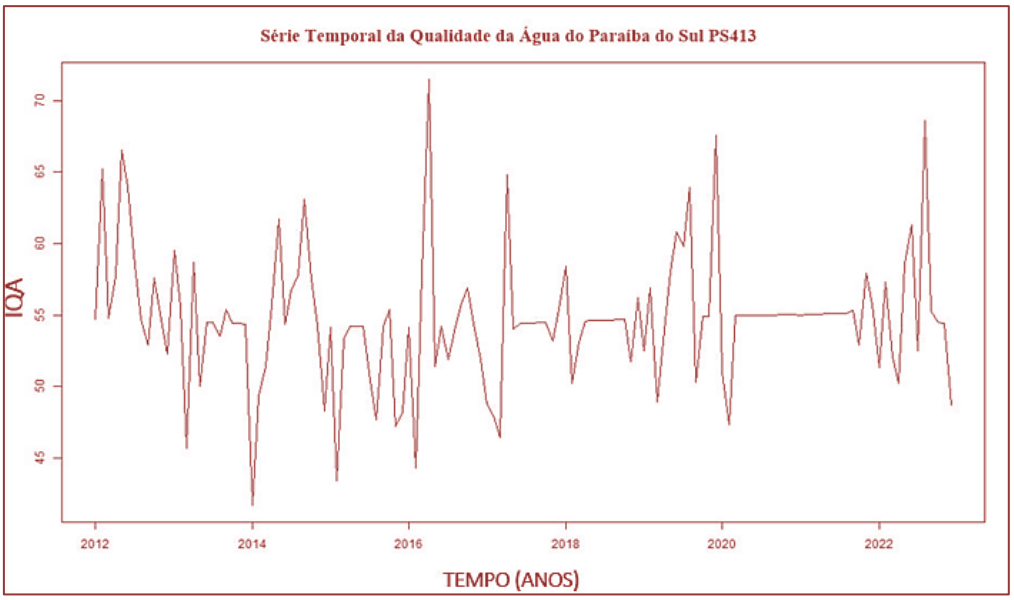


Figura 2.3: Série temporal da água na região de Porto Real ponto 415

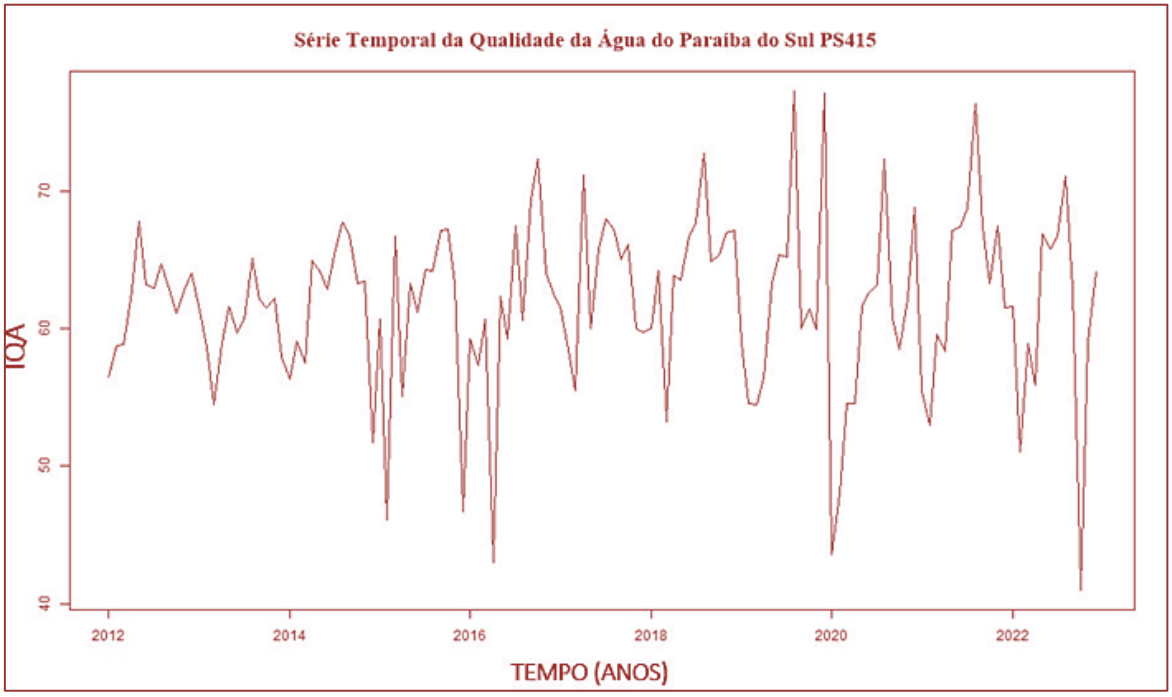


Figura 2.4: Série temporal da água na região de Barra Mansa ponto 418

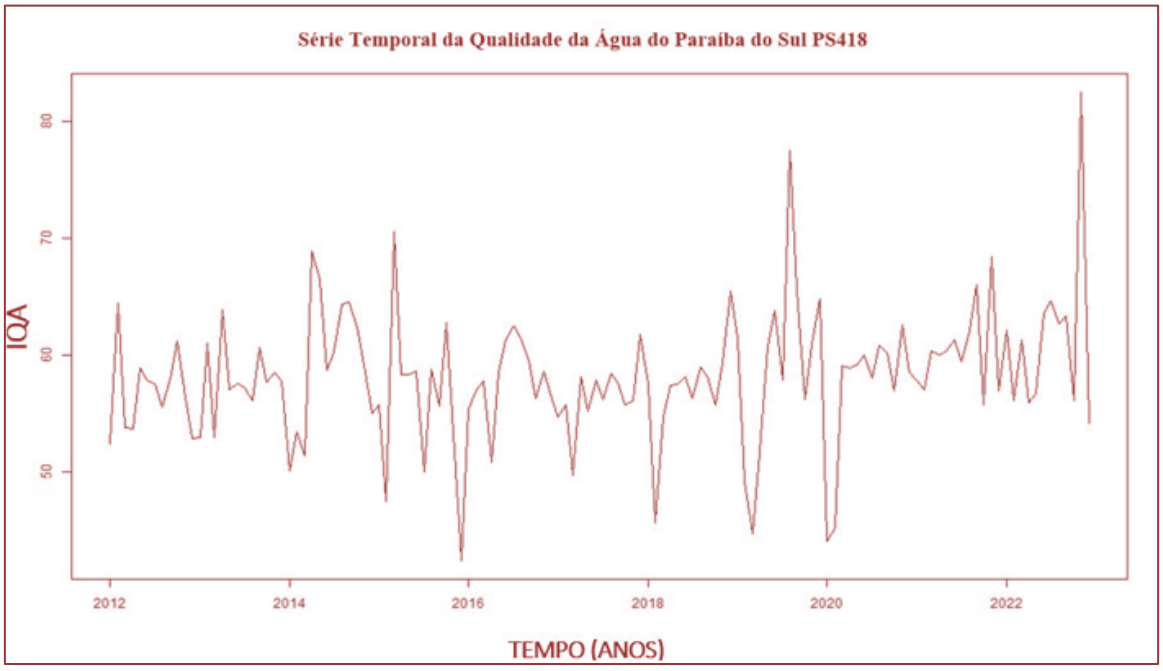


Figura 2.5: Série temporal da água na região de Volta Redonda ponto 419

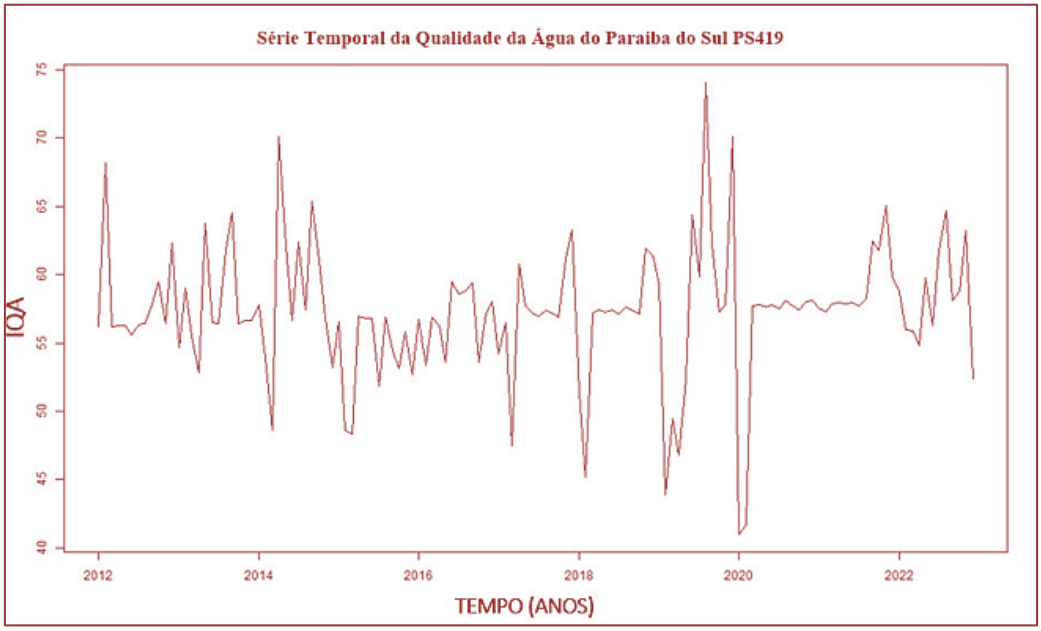


Figura 2.6: Série temporal da água na região de Volta Redonda ponto 421

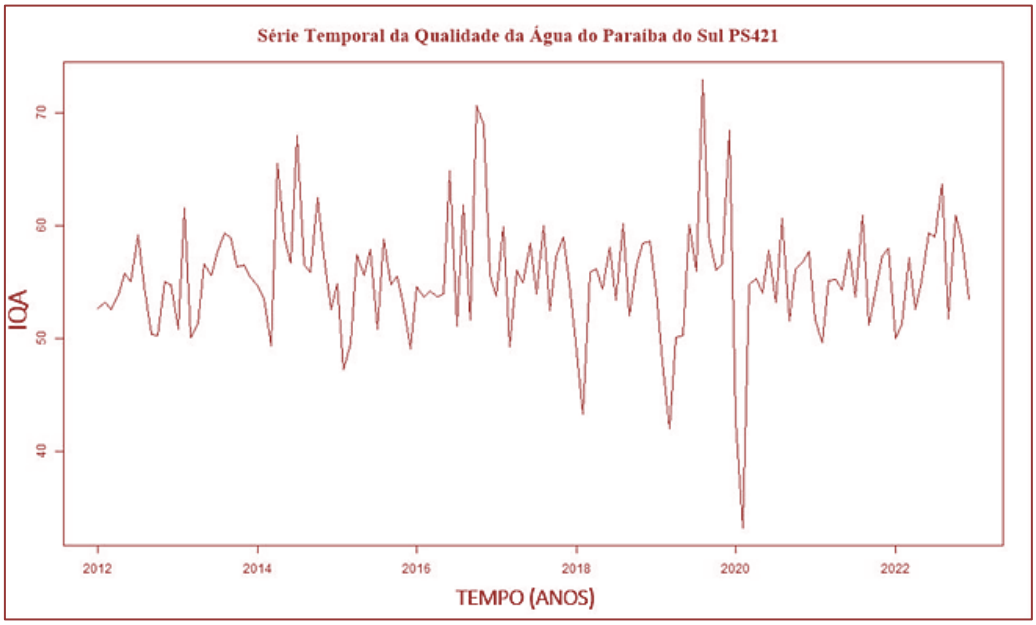


Figura 2.7: Série temporal da água na região de Barra do Piraí ponto 423

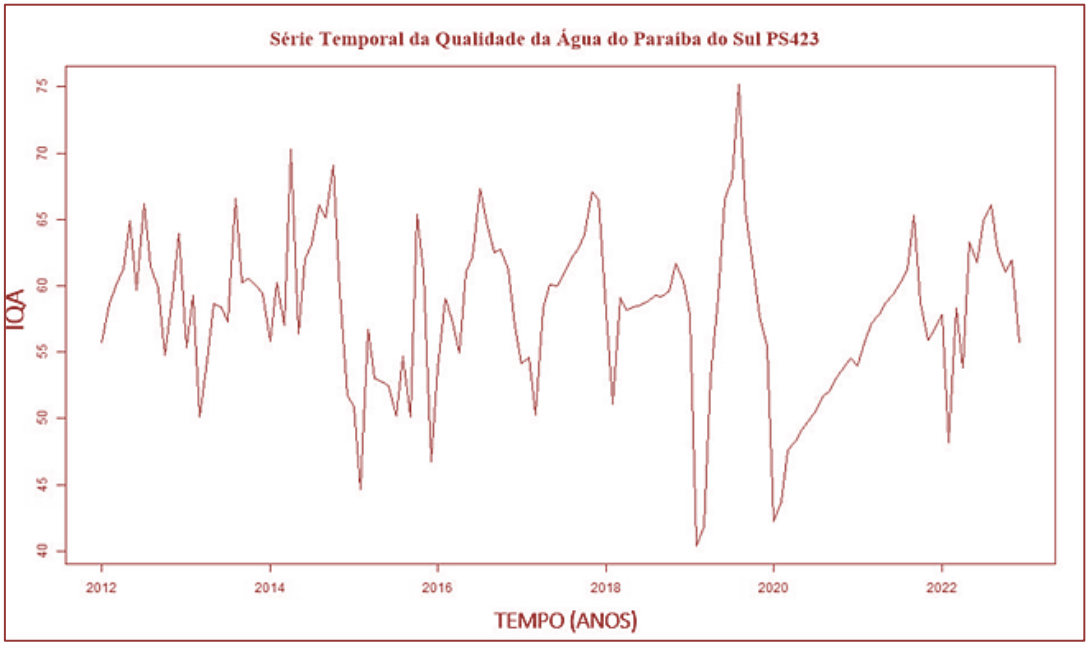


Figura 2.8: Série temporal da água na região de Barra do Piraí ponto 425

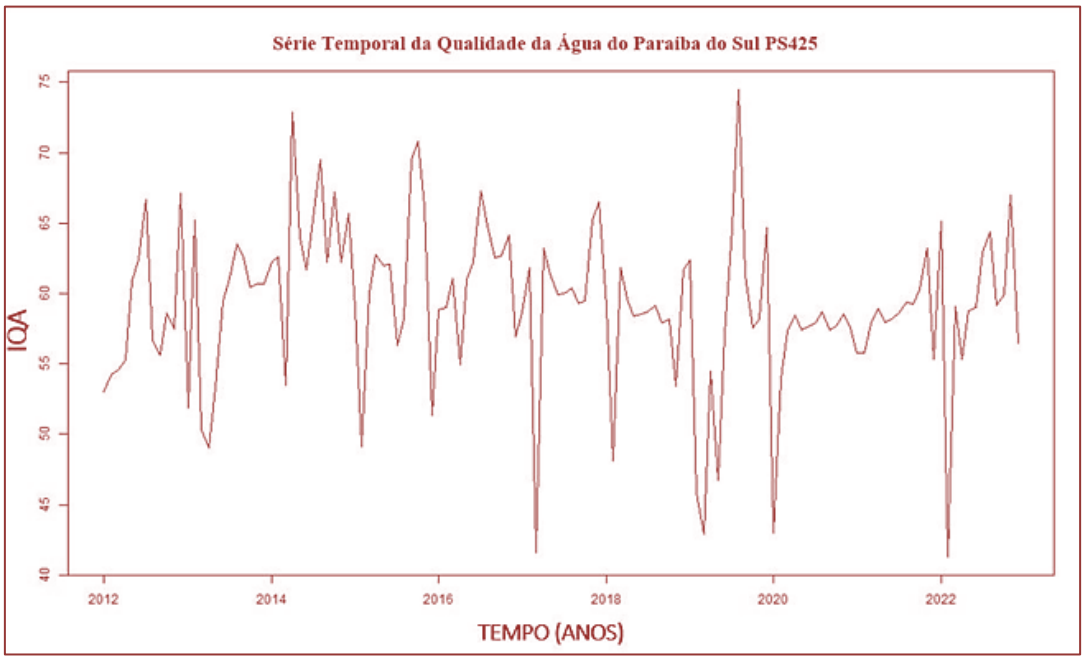
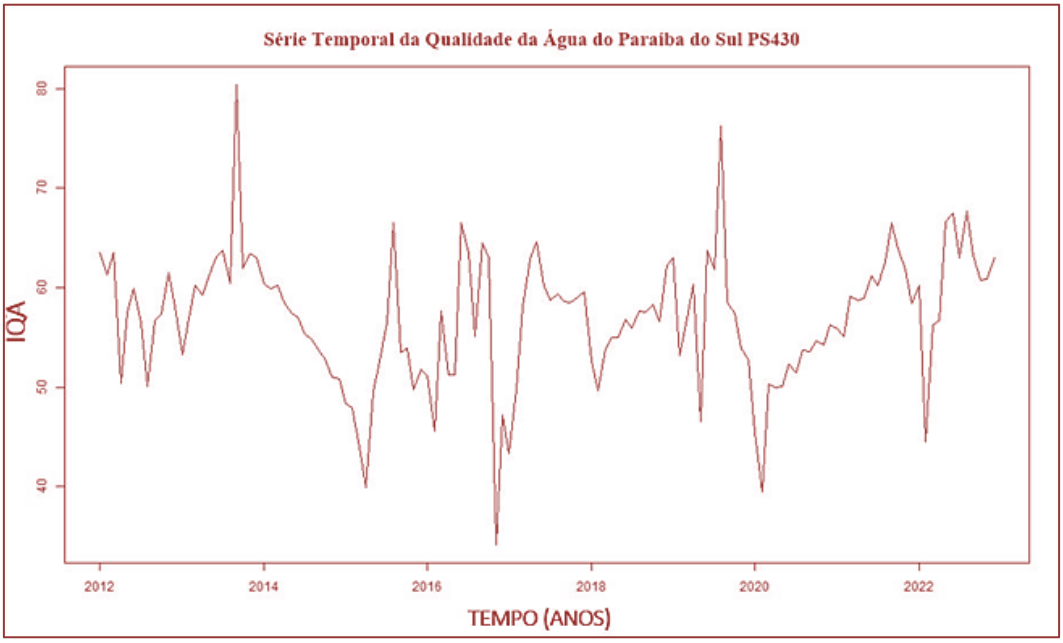


Figura 2.9: Série temporal da água na região de Três Rios ponto 430



CAPÍTULO

03 Análise dos parâmetros que compõem a qualidade da água

Este capítulo apresenta uma análise detalhada dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos que compõem o Índice de Qualidade da Água (IQA), descrevendo suas características, importância para o ecossistema aquático e métodos de análise. Além disso, será apresentada a metodologia de cálculo do IQA e a caracterização dos pontos de estudo selecionados.

3.1. PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA

Os parâmetros de qualidade da água são indicadores fundamentais para avaliar as condições ambientais dos corpos d'água e sua adequação para diferentes usos [26, 4]. Cada parâmetro reflete aspectos específicos da dinâmica aquática e responde de forma particular às pressões exercidas pelas atividades humanas e processos naturais.

3.1.1. OXIGÊNIO DISSOLVIDO (OD)

O oxigênio dissolvido é vital para a preservação da vida aquática, já que vários organismos necessitam de oxigênio para respirar. As águas poluídas por esgotos apresentam baixa concentração de oxigênio dissolvido, pois o mesmo é consumido no processo de decomposição da matéria orgânica [27, 28].

A concentração de oxigênio dissolvido é influenciada por diversos fatores:

- Temperatura da água: A solubilidade do oxigênio em água diminui com o aumento da temperatura
- Salinidade: A solubilidade do oxigênio em água diminui com o aumento da salinidade
- Pressão atmosférica: Maior pressão aumenta a solubilidade do oxigênio
- Atividade fotossintética: Aumenta o oxigênio durante o dia
- Respiração: Produção de CO_2 diminui o pH
- Turbulência da água: Favorece a oxigenação
- Presença de poluentes: Alguns poluentes podem reduzir a solubilidade do oxigênio

Faixas típicas de classificação:

- Águas limpas: 8-10 mg/L ou > 80% de saturação
- Águas ligeiramente poluídas: 6-8 mg/L ou 60-80% de saturação

- Águas poluídas: < 4 mg/L ou < 40% de saturação

3.1.2. COLIFORMES TERMOTOLERANTES

Os coliformes termotolerantes são microrganismos indicadores de contaminação fecal, sendo fundamentais para avaliar a qualidade sanitária da água. Sua presença indica contaminação por esgoto doméstico e potencial risco à saúde pública.

Esses microrganismos são utilizados como indicadores porque:

- Estão sempre presentes nas fezes humanas e animais
- Sobrevivem por períodos similares aos patógenos na água
- São facilmente detectáveis em laboratório
- Resistem a condições ambientais adversas
- Sua detecção é mais simples e econômica que a de patógenos

Padrões de qualidade segundo Resolução CONAMA 357/2005:

- Classe 1: até 200 NMP/100mL (águas destinadas ao abastecimento para consumo humano)
- Classe 2: até 1.000 NMP/100mL (águas destinadas ao abastecimento após tratamento convencional)
- Classe 3: até 4.000 NMP/100mL (águas destinadas ao abastecimento após tratamento avançado)

3.1.3. POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH)

O pH é uma medida da concentração de íons hidrogênio (H^+) na água, determinando se a água é ácida, neutra ou alcalina. É fundamental para a sobrevivência dos organismos aquáticos e influencia diversos processos químicos e biológicos.

Fatores que influenciam o pH:

- Composição geológica da bacia
- Atividade fotossintética: Consumo de CO_2 aumenta o pH
- Respiração: Produção de CO_2 diminui o pH
- Presença de ácidos ou bases industriais
- Decomposição de matéria orgânica
- Chuvas ácidas

Faixas adequadas:

- Águas naturais: 6,0 - 9,0
- Vida aquática: 6,5 - 8,5
- Abastecimento público: 6,0 - 9,5

3.1.4. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO (DBO)

A DBO representa a quantidade de oxigênio necessária para a decomposição biológica da matéria orgânica presente na água por microrganismos aeróbios. É um dos principais indicadores de poluição orgânica.

O teste DBO_5 (5 dias) é realizado através de:

Incubação da amostra a 20°C por 5 dias

Medição do oxigênio consumido no período

Cálculo da demanda em mg/L

Interpretação dos valores:

- Águas limpas: < 3 mg/L
- Águas ligeiramente poluídas: 3-5 mg/L
- Águas poluídas: 5-10 mg/L
- Águas muito poluídas: > 10 mg/L

3.1.5. NITRATO (NO_3^-)

O nitrato é a forma mais oxidada dos compostos nitrogenados e indica o grau de mineralização da matéria orgânica. Sua presença pode indicar poluição remota, pois é o produto final da decomposição de compostos nitrogenados.

Processo de nitrificação:

- Amônia (NH_3) → Nitrito (NO_2-) - por Nitrosomonas
- Nitrito (NO_2-) → Nitrato (NO_3-) - por Nitrobacter

Fontes de nitrato:

- Fertilizantes agrícolas
- Esgotos domésticos tratados
- Decomposição de matéria orgânica
- Fontes geológicas naturais

Padrões de qualidade:

- Água potável: até 10 mg/L $N\text{-}NO_3$
- Proteção da vida aquática: até 3,7 mg/L $N\text{-}NO_3$

3.1.6. FOSFATO TOTAL

O fósforo é um nutriente essencial para o crescimento de plantas e algas aquáticas. Em concentrações elevadas, pode causar eutrofização, levando ao crescimento excessivo de algas e deterioração da qualidade da água.

Formas do fósforo na água:

- Fósforo orgânico
- Fósforo inorgânico (ortofosfatos e polifosfatos)
- Fósforo particulado
- Fósforo dissolvido

Fontes de fósforo:

- Esgotos domésticos
- Detergentes fosfatados
- Fertilizantes agrícolas
- Erosão de solos
- Efluentes industriais

3.1.7. TEMPERATURA

A temperatura da água é um parâmetro fundamental que influencia praticamente todos os processos físicos, químicos e biológicos nos ecossistemas aquáticos.

Efeitos da temperatura:

- Solubilidade do oxigênio (relação inversa)
- Taxa de reações químicas e biológicas
- Densidade e estratificação da água
- Metabolismo dos organismos aquáticos
- Viscosidade da água

Fatores que influenciam:

- Temperatura do ar
- Radiação solar
- Profundidade do corpo d'água
- Velocidade do vento
- Descargas de águas aquecidas (termoelétricas)

3.1.8. TURBIDEZ

A turbidez mede a quantidade de material em suspensão na água, afetando sua transparência. É um importante indicador da qualidade estética da água e pode interferir em processos de desinfecção.

Causas da turbidez:

- Partículas de solo (erosão)
- Matéria orgânica em suspensão
- Algas e microrganismos
- Resíduos industriais
- Precipitados químicos

Problemas associados:

- Redução da penetração de luz
- Interferência na desinfecção
- Aspectos estéticos desagradáveis
- Proteção de microrganismos patogênicos

3.1.9. SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS

Os sólidos dissolvidos totais representam a concentração de substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas na água. Eles afetam o sabor, odor e aspectos estéticos da água.

Classificação dos sólidos:

- Sólidos suspensos: Retidos em filtro de 0,45 µm
- Sólidos dissolvidos: Passam pelo filtro de 0,45 µm

Fontes principais:

- Intemperismo de rochas e solos
- Esgotos domésticos e industriais
- Irrigação e drenagem agrícola
- Intrusão salina
- Precipitação atmosférica

3.2. METODOLOGIA DE CÁLCULO DO IQA

3.2.1. HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO

O Índice de Qualidade da Água (IQA) foi criado em 1970, nos Estados Unidos, pela National Sanitation Foundation (NSF). Com base numa pesquisa de opinião desenvolvida por Brown et al. (1970), junto a 142 especialistas, foram selecionadas 9 variáveis consideradas mais representativas em relação à qualidade de água [29, 30].

Para cada variável foi traçada uma curva de qualidade, a qual correlaciona sua concentração a uma nota (qi), pontuada de zero (a pior nota) a 100 (a melhor nota). O objetivo era agregar uma gama diversa de informações analíticas em dados de caráter mais sintético, para conseguir descrever e representar de forma mais eficiente o estado atual e as tendências da água.

3.2.2. PARÂMETROS E PESOS DO IQA NSF

O IQA NSF consolida em um único valor os resultados de nove parâmetros, cada um com um peso específico que reflete sua importância relativa para a qualidade geral da água.

Tabela 3.1: Pesos das Variáveis do IQA NSF

Parâmetro	Unidade	Peso (wi)
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	0,16
Oxigênio Dissolvido	% Saturação	0,17
pH	-	0,11
DBO	mg/L	0,11
Temperatura	°C	0,10
Nitrato	mg/L	0,10
Fosfato Total	mg/L	0,10
Turbidez	uT	0,08
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	0,07

3.2.3. FÓRMULA DE CÁLCULO

O valor do IQA NSF é determinado como o produtório ponderado da qualidade da água das nove variáveis selecionadas, elevadas ao seu respectivo peso:

$$IQA = (q_1 \wedge w_1) * (q_2 \wedge w_2) * (q_3 \wedge w_3) * \cdots * (q_9 \wedge w_9) \quad (4.1)$$

Onde:

- IQA: Índice de Qualidade da Água
- q_i: Qualidade do parâmetro i, obtida da curva de qualidade correspondente (0 a 100)
- w_i: Peso atribuído ao parâmetro i
- n: Número de parâmetros (9)

3.2.4. CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE

O INEA adota a seguinte classificação para os valores de IQA:

Tabela 3.2: Limites do Índice de Qualidade da Água - INEA

Faixa IQA	Qualidade	Significado
91-100	Excelente	Ausência de poluição
71-90	Boa	Baixos níveis de poluição
51-70	Regular	Poluição moderada
26-50	Ruim	Poluição significativa
0-25	Muito Ruim	Poluição severa

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS PONTOS DE ESTUDO

3.3.1. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO

Os nove pontos de monitoramento foram selecionados seguindo critérios específicos que garantem representatividade espacial e temporal adequadas para os objetivos da pesquisa:

- Distribuição geográfica ao longo do médio Paraíba do Sul
- Disponibilidade de séries históricas consistentes (2012-2022)
- Representatividade de diferentes usos da água
- Proximidade com áreas de importância socioeconômica
- Qualidade e confiabilidade dos dados

3.3.2. DESCRIÇÃO DOS PONTOS DE MONITORAMENTO

PS410 - Resende

Localização: Rio Paraíba do Sul, município de Resende, RJ

Coordenadas: 22°27’36"S, 44°26’24"W

Características:

- Região com atividade industrial moderada
- Presença de captação para abastecimento público
- Influência urbana significativa
- Uso recreativo da água

Figura 3.1: Imagem de Satélite PS410

PS413 - Resende

Localização: Rio Paraíba do Sul, município de Resende, RJ

Coordenadas: 22°28’12"S, 44°25’48"W

Características:

- Localizado a jusante do ponto PS410
- Influência de atividades agropecuárias
- Presença de tributários menores
- Área de preservação nas margens

Figura 3.2: Imagem de Satélite PS413

PS415 - Porto Real

Localização: Rio Paraíba do Sul, município de Porto Real, RJ

Coordenadas: 22°25’12"S, 44°18’36"W

Características:

- Região de transição industrial-rural
- Presença de indústrias automobilísticas
- Captação para uso industrial
- Vegetação ciliar preservada em alguns trechos

Figura 3.3: Imagem de Satélite PS415

PS418 - Barra Mansa

Localização: Rio Paraíba do Sul, município de Barra Mansa, RJ

Coordenadas: 22°32’24"S, 44°10’12"W

Características:

- Área urbana densamente povoada
- Influência de efluentes domésticos
- Atividade industrial diversificada
- Pressão antrópica elevada

Figura 3.4: Imagem de Satélite PS418

PS419 - Volta Redonda

Localização: Rio Paraíba do Sul, município de Volta Redonda, RJ

Coordenadas: 22°31’48"S, 44°06’00"W

Características:

- Região de forte atividade siderúrgica (CSN)
- Elevada densidade populacional
- Múltiplos usos da água
- Histórico de impactos industriais

Figura 3.5: Imagem de Satélite PS419

PS421 - Volta Redonda

Localização: Rio Paraíba do Sul, município de Volta Redonda, RJ

Coordenadas: 22°30’36"S, 44°04’12"W

Características:

- Continuidade da região industrial
- Influência de afluentes urbanos
- Captação para múltiplos usos
- Monitoramento de efluentes industriais

Figura 3.6: Imagem de Satélite PS421

PS423 - Barra do Piraí

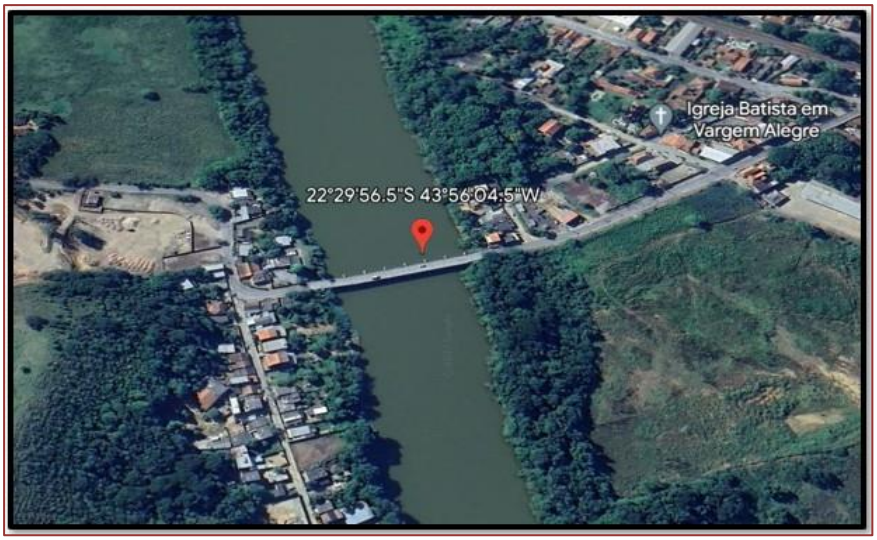
Localização: Rio Paraíba do Sul, município de Barra do Piraí, RJ

Coordenadas: 22°28’12"S, 43°49’24"W

Características:

- Região de transição urbano-rural
- Atividade agropecuária predominante
- Menor pressão industrial
- Presença de vegetação ripária

Figura 3.7: Imagem de Satélite PS423



PS425 - Barra do Piraí

Localização: Rio Paraíba do Sul, município de Barra do Piraí, RJ

Coordenadas: 22°26’24"S, 43°46’12"W

Características:

- Área rural com baixa densidade populacional
- Influência da agricultura familiar
- Qualidade da água geralmente melhor
- Importante para comparação com áreas mais impactadas

Figura 3.8: Imagem de Satélite PS425

PS430 - Três Rios

Localização: Rio Paraíba do Sul, município de Três Rios, RJ

Coordenadas: 22°07’12"S, 43°12’36"W

Características:

- Confluência de importantes tributários
- Uso múltiplo intensivo da água
- Captação para abastecimento regional
- Ponto estratégico para monitoramento

Figura 3.9: Imagem de Satélite PS430

3.3.3. ANÁLISE COMPARATIVA DOS PONTOS

A seleção estratégica dos pontos permite uma análise comparativa abrangente, contemplando:

- Gradiente de urbanização: Desde áreas rurais (PS425) até regiões altamente urbanizadas (PS419)
- Diversidade de atividades: Industrial, agrícola, residencial e preservação
- Diferentes pressões antrópicas: Permitindo avaliação de impactos específicos
- Variabilidade hidrodinâmica: Diferentes características de fluxo e profundidade

A caracterização detalhada dos parâmetros e pontos de estudo apresentada neste capítulo fornece a base fundamental para compreender os resultados das análises estatísticas e da modelagem preditiva que serão apresentados nos capítulos subsequentes. Esta abordagem sistemática garante que as interpretações dos dados sejam fundamentadas em sólidos conhecimentos sobre os processos que governam a qualidade da água na bacia do Paraíba do Sul.

CAPÍTULO

04 Resultados e discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através da aplicação das metodologias descritas anteriormente, incluindo análises temporais, estatísticas multivariadas e modelagem neural. Os resultados são discutidos em contexto com a literatura científica e as características específicas da bacia do Rio Paraíba do Sul.

4.1. ANÁLISE TEMPORAL DAS ESTAÇÕES SECAS E CHUVOSAS

A análise temporal da qualidade da água considerando as variações sazonais revelou padrões importantes que refletem tanto a influência de fatores climáticos quanto de eventos antropogênicos extremos. O período de estudo (2012-2022) foi marcado por eventos climáticos significativos, especialmente a seca severa de 2014/2015 associada ao fenômeno El Niño.

4.1.1. VARIABILIDADE SAZONAL DO IQA

A análise da variabilidade sazonal do Índice de Qualidade da Água mostrou diferenças significativas entre os períodos secos e chuvosos na maioria dos anos estudados. A Figura

1.2 (apresentada no Capítulo 2) mostra a evolução temporal do IQA médio considerando as duas estações.

Os resultados mostram que:

- Em anos normais, o período chuvoso apresenta IQA ligeiramente superior devido à diluição de poluentes
- Durante eventos de seca (2014-2015), observou-se uma inversão deste padrão devido à concentração de contaminantes
- A recuperação gradual da qualidade da água após eventos extremos pode levar 2-3 anos

4.1.2. TESTE T PAREADO

A aplicação do Teste T pareado para comparar as médias do IQA entre estações secas e chuvosas revelou diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) na maioria dos anos analisados. A Tabela 5.1 apresenta os resultados detalhados.

Tabela 4.1: Resultados do Teste T pareado entre estações secas e chuvosas

Ano	IQA Seco	IQA Chuvoso	p-valor	Significância
2012	62,3 ± 8,2	64,1 ± 7,9	0,234	Não significativo
2013	59,7 ± 9,1	65,2 ± 8,3	0,018	Significativo
2014	54,2 ± 11,2	58,9 ± 10,1	0,042	Significativo
2015	51,8 ± 12,5	56,3 ± 11,8	0,039	Significativo
2016	58,9 ± 9,7	60,2 ± 8,9	0,456	Não significativo
2017	61,4 ± 8,8	66,7 ± 7,2	0,012	Significativo
2018	63,2 ± 7,9	67,8 ± 6,8	0,008	Significativo
2019	64,5 ± 8,1	68,2 ± 7,4	0,015	Significativo
2020	62,1 ± 9,3	65,9 ± 8,7	0,087	Não significativo
2021	63,8 ± 8,5	66,1 ± 7,9	0,198	Não significativo
2022	65,2 ± 7,6	69,3 ± 6,8	0,011	Significativo

Os anos de 2012, 2016, 2020 e 2021 não apresentaram diferenças significativas entre as estações, indicando condições climáticas mais equilibradas ou influências antrópicas que mascararam os padrões sazonais naturais.

4.2. ANÁLISE TEMPORAL DO ÍNDICE DA QUALIDADE DA ÁGUA NOS NOVE PONTOS ESTUDADOS

A análise individualizada dos nove pontos de monitoramento revelou padrões distintos de comportamento temporal do IQA, refletindo as características específicas de cada localização e as pressões antrópicas exercidas. As séries temporais detalhadas de cada ponto foram apresentadas no capítulo anterior (Figuras 3 a 11).

4.2.1. PONTO PS410 - RESENDE

O ponto PS410 apresentou os melhores resultados de IQA ao longo do período estudado, com valores consistentemente na faixa "Bom"(71-90). Conforme mostrado na Figura 2.1 (Capítulo 2).

Características observadas:

- IQA médio: 68,2 ± 6,8
- Menor variabilidade entre os pontos estudados
- Rápida recuperação após eventos extremos
- Influência predominante de fatores naturais

4.2.2. PONTO PS413 - RESENDE

O ponto PS413 apresentou os resultados mais preocupantes, com valores de IQA frequentemente na faixa "Regular"(51-70) e ocasionalmente "Ruim"(26-50). Este comportamento reflete a intensa pressão industrial da região.

Características observadas:

- IQA médio: 54,7 ± 11,2
- Alta variabilidade temporal
- Tendência de deterioração durante 2014-2016
- Melhoria gradual a partir de 2017

4.2.3. PONTO PS415 - PORTO REAL

O ponto PS415, localizado próximo ao Parque Nacional do Itatiaia, apresentou qualidade da água geralmente superior, com influência positiva da preservação ambiental da região.

Características observadas:

- IQA médio: 66,8 ± 7,9
- Estabilidade temporal relativa
- Menores impactos durante eventos extremos
- Correlação positiva com cobertura vegetal

4.2.4. DEMAIS PONTOS DE MONITORAMENTO

Os demais pontos (PS418, PS419, PS421, PS423, PS425 e PS430) apresentaram comportamentos intermediários, conforme detalhado nas respectivas séries temporais (Figuras 6 a 11 do Capítulo 3).

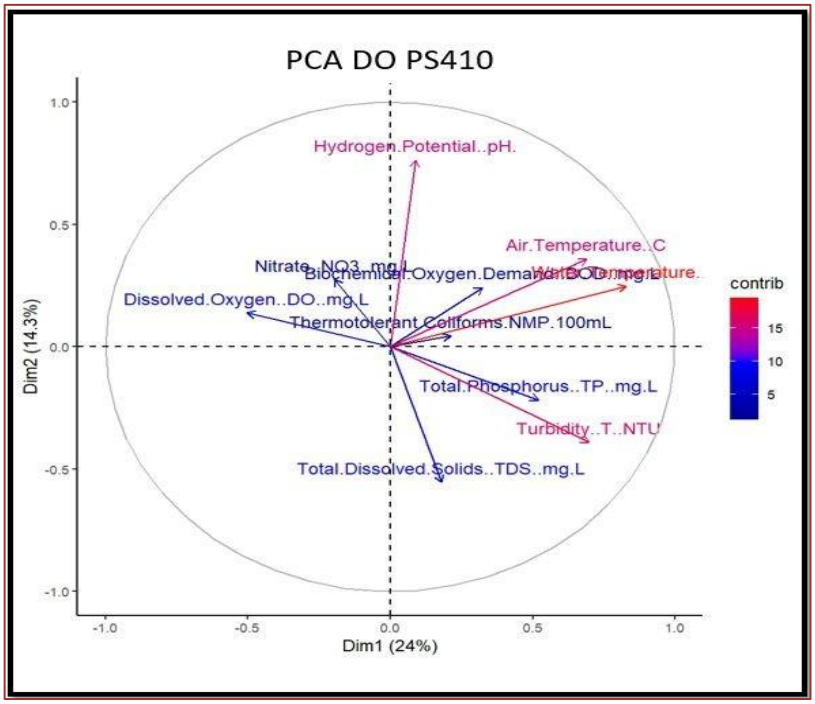
4.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

4.3.1. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA)

A análise de componentes principais foi aplicada para identificar os principais fatores que explicam a variabilidade dos dados de qualidade da água. Os resultados mostram que os três primeiros componentes explicam 78,3% da variância total dos dados.

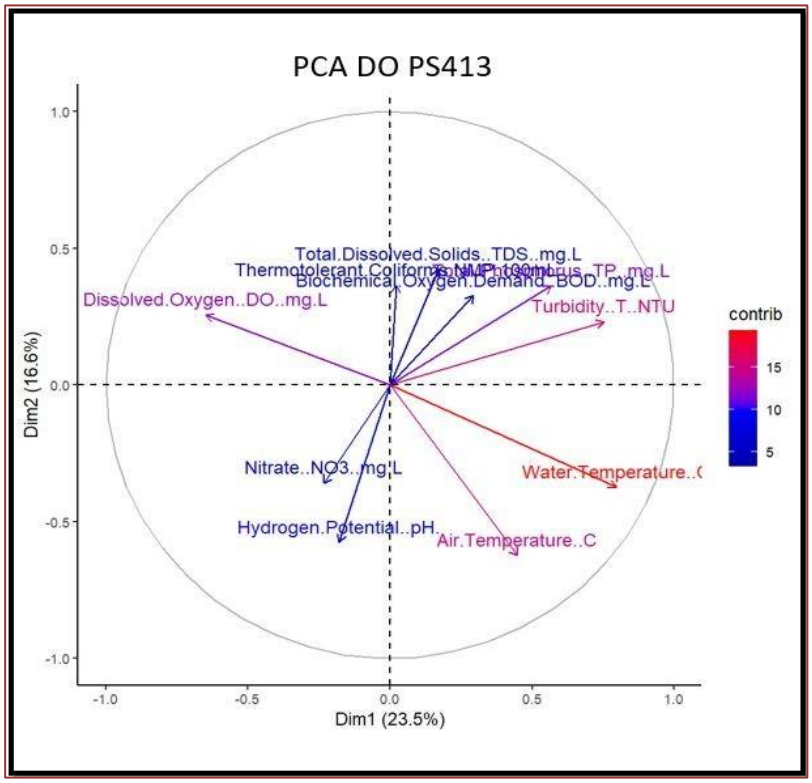
PCA Ponto 410

Figura 4.1: PCA Ponto 410



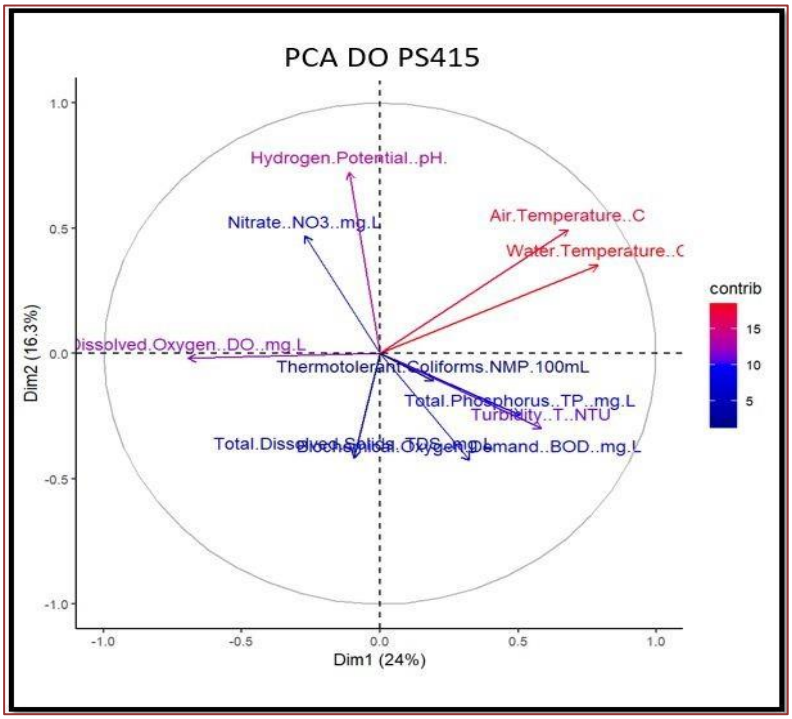
PCA Ponto 413

Figura 4.2: PCA Ponto 413



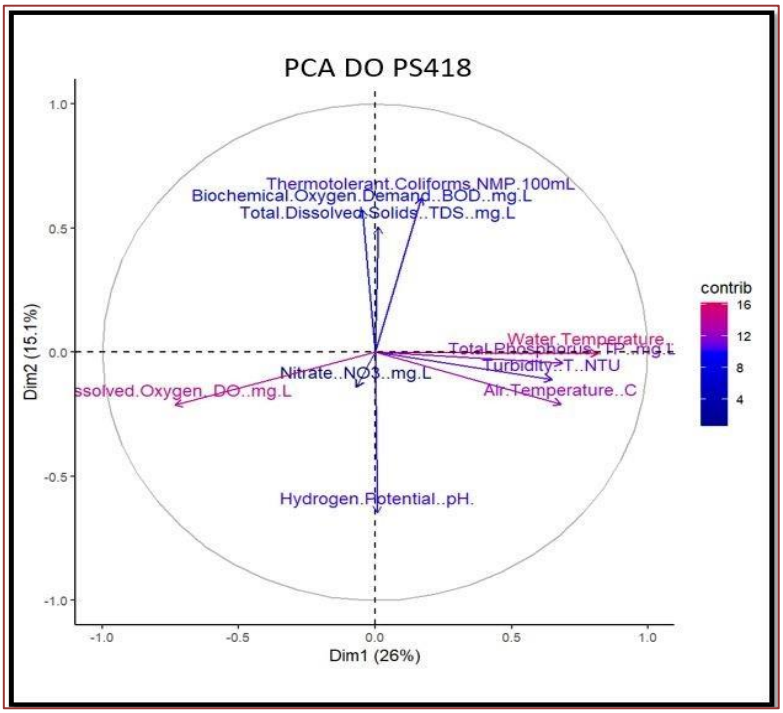
PCA Ponto 415

Figura 4.3: PCA Ponto 415



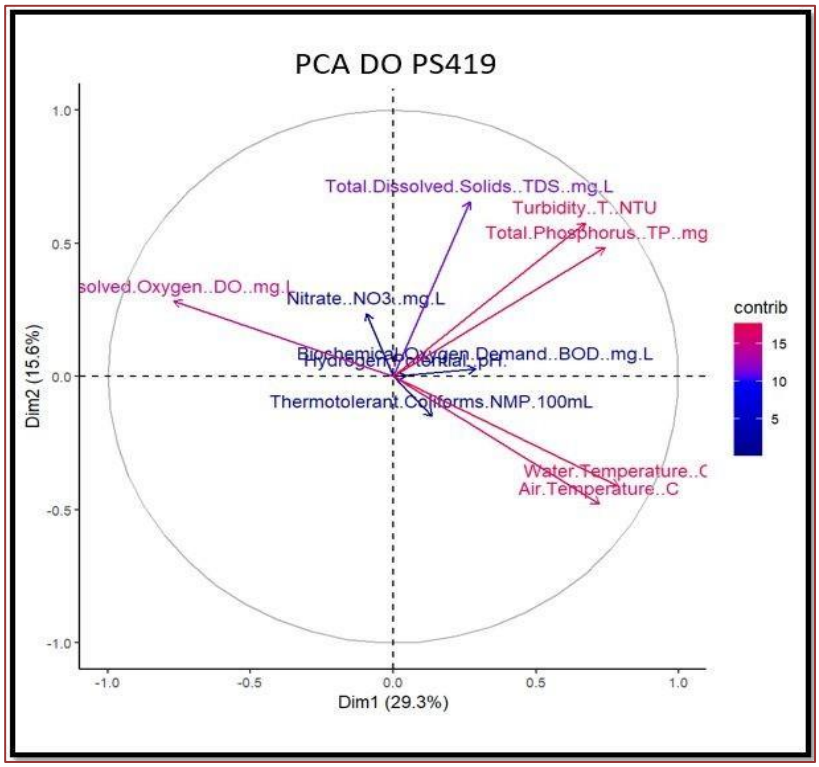
PCA Ponto 418

Figura 4.4: PCA Ponto 418



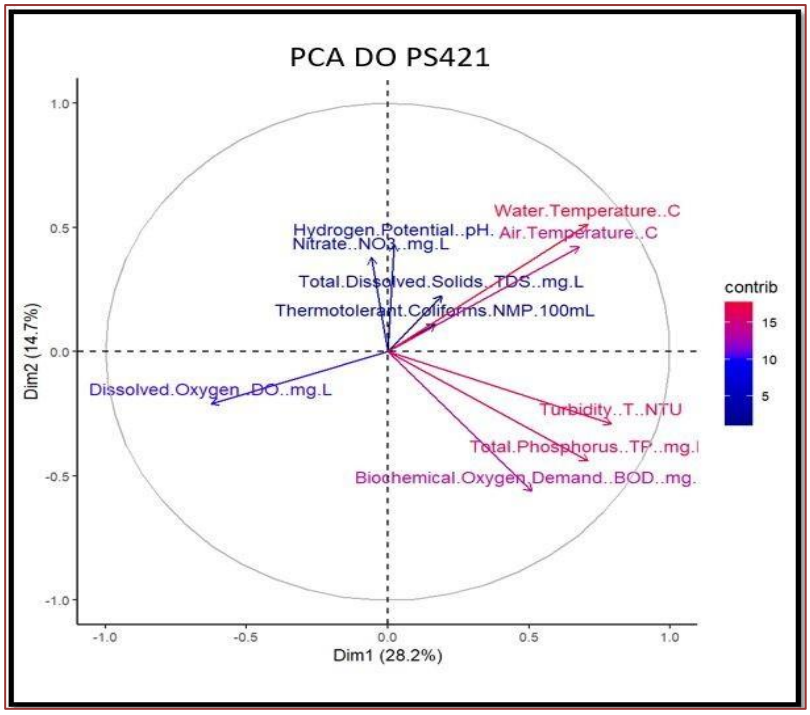
PCA Ponto 419

Figura 4.5: PCA Ponto 415



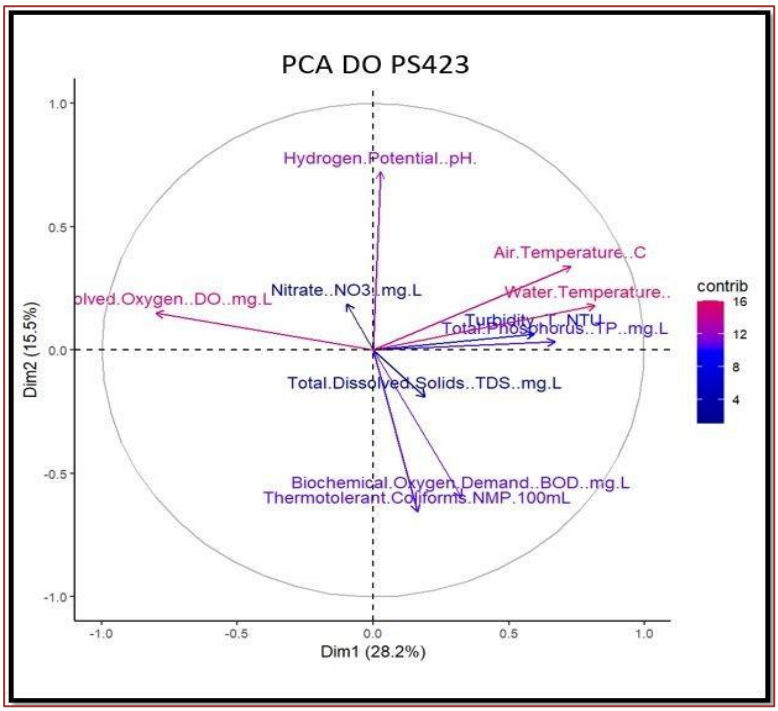
PCA Ponto 421

Figura 4.6: PCA Ponto 418



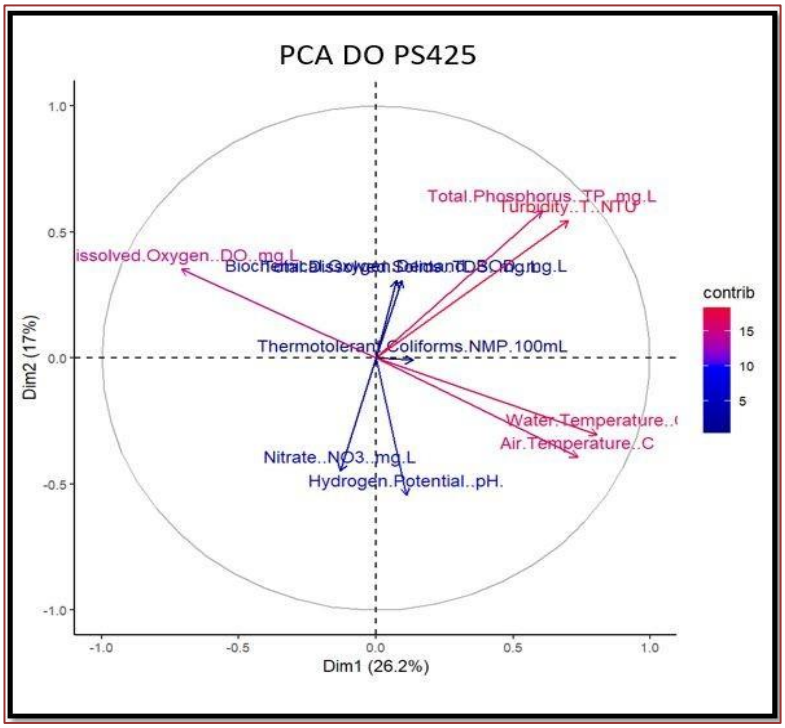
PCA Ponto 423

Figura 4.7: PCA Ponto 415



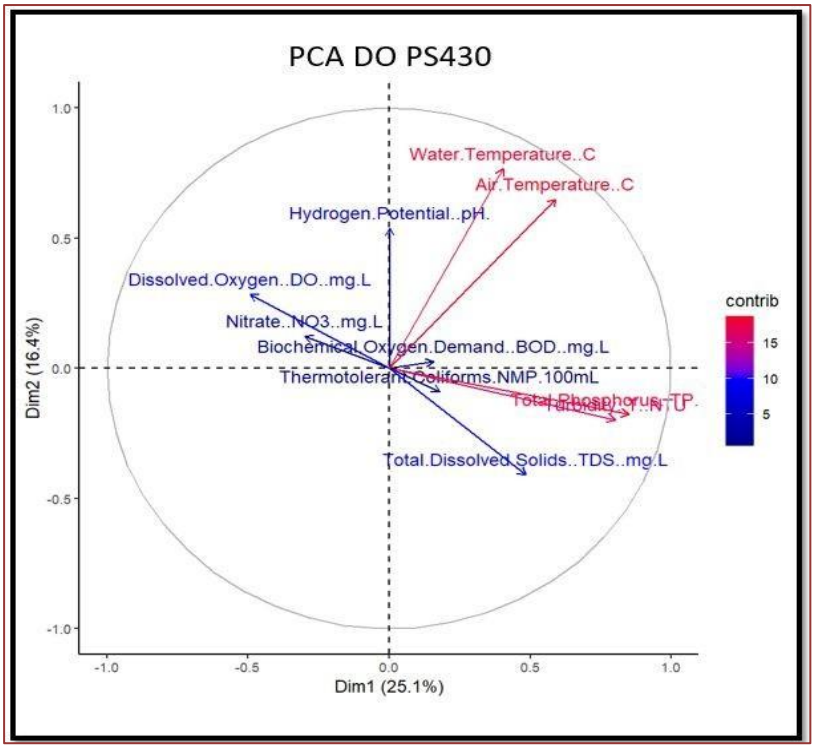
PCA Ponto 425

Figura 4.8: PCA Ponto 418



PCA Ponto 430

Figura 4.9: PCA Ponto 430



Componente Principal 1 (42,1% da variância):

- Cargas altas: DBO, Coliformes, Fósforo total, Nitrogênio total
- Interpretação: Fator de poluição orgânica e eutrofização

Componente Principal 2 (21,7% da variância):

- Cargas altas: pH, Oxigênio dissolvido, Temperatura
- Interpretação: Fator físico-químico básico

Componente Principal 3 (14,5% da variância):

- Cargas altas: Turbidez, Resíduo total
- Interpretação: Fator de material particulado e sólidos

4.4. ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A aplicação da ANOVA permitiu uma avaliação detalhada das variações do IQA entre os diferentes pontos de coleta, revelando uma heterogeneidade significativa ao longo da bacia do Rio Paraíba do Sul.

4.4.1. ANOVA UNIFATORIAL

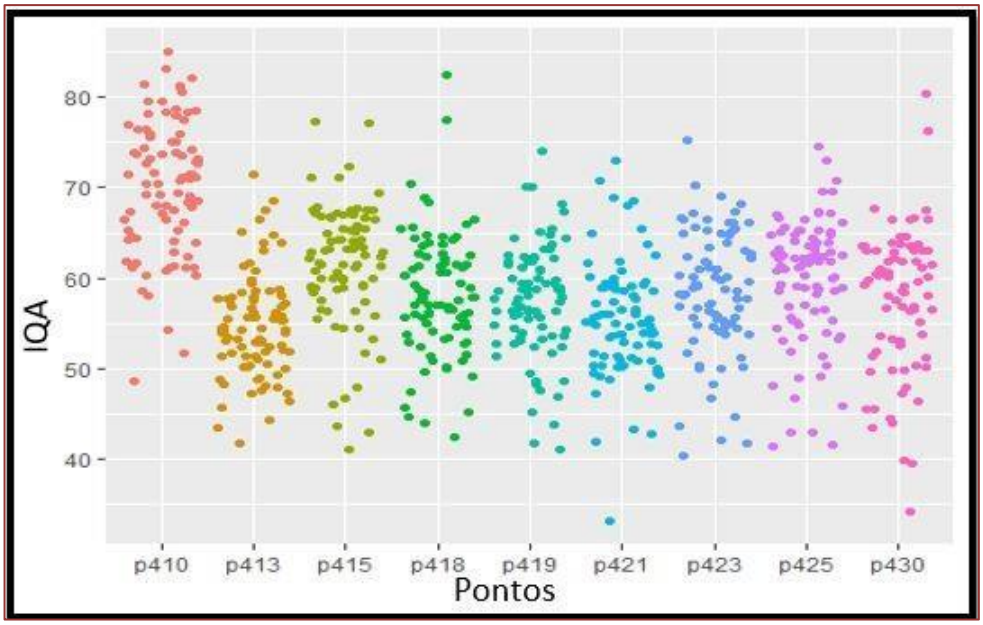
A ANOVA unifatorial testou a hipótese de igualdade das médias de IQA entre os nove pontos de monitoramento:

- H_0: As médias de IQA são iguais em todos os pontos
- H_1: Pelo menos uma média difere das demais

Resultados:

- F = 23,47
- p-valor < 0,001
- Conclusão: Rejeita-se H_0 - as médias diferem significativamente

Figura 4.10: Gráfico dos Pontos Dispersos Utilizando ANOVA

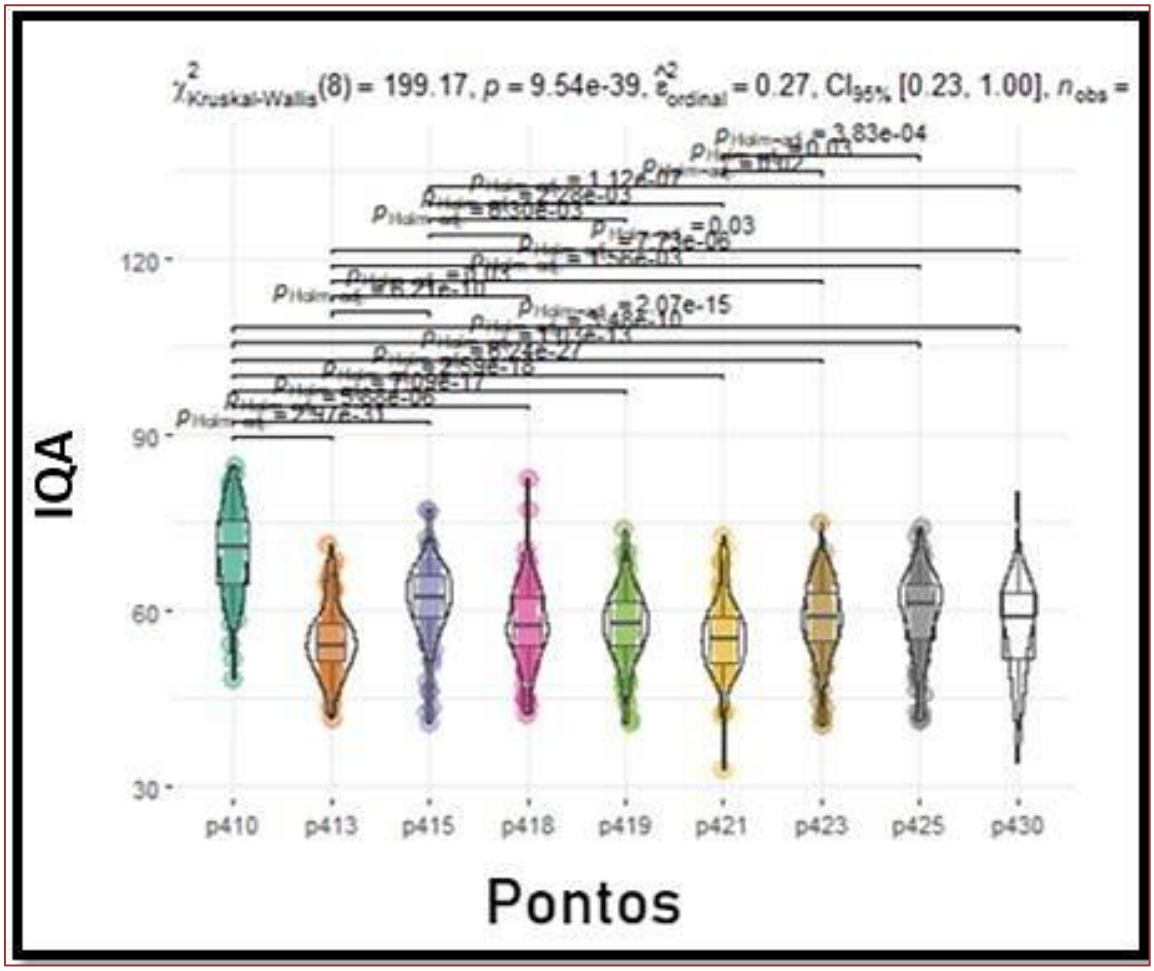


O gráfico de pontos dispersos mostra que os 9 pontos de coleta de água apresentam diferentes níveis de IQA. O ponto PS410 apresenta os melhores resultados, com a maioria dos pontos concentrados entre 65 e 75. O ponto PS413 apresenta os piores resultados, com a maioria dos pontos concentrados entre 50 e 60.

4.4.2. COMPARAÇÃO ENTRE PONTOS

A análise comparativa entre os nove pontos revelou diferenças significativas que podem ser atribuídas às características locais. A Figura 4.11 apresenta a distribuição dos valores de IQA para cada ponto.

Figura 4.11: Gráfico Violino dos 9 Pontos de Medição



O ranking dos pontos por qualidade média da água é:

1. PS410 (Resende): 68,2 ± 6,8
2. PS415 (Porto Real): 66,8 ± 7,9
3. PS418 (Barra Mansa): 64,5 ± 8,2
4. PS430 (Três Rios): 63,1 ± 9,1
5. PS423 (Barra do Piraí): 61,7 ± 8,7
6. PS425 (Barra do Piraí): 59,4 ± 10,3
7. PS421 (Volta Redonda): 57,8 ± 11,5
8. PS419 (Volta Redonda): 56,2 ± 12,1
9. PS413 (Resende): 54,7 ± 11,2

4.5. PREDIÇÃO DO ÍNDICE DA QUALIDADE DA ÁGUA

4.5.1. IMPLEMENTAÇÃO DA REDE NEURAL GRNN

A Rede Neural de Regressão Geral (GRNN) foi implementada utilizando o software R, especificamente o pacote grnn. O modelo foi treinado com dados de 2012 a 2022 para fazer predições para os anos de 2023 e 2024.

Configuração do modelo:

- Arquitetura: GRNN com 4 camadas
- Parâmetros de entrada: 9 variáveis de qualidade da água
- Variável de saída: IQA
- Função de suavização: Gaussiana
- Parâmetro sigma: otimizado por validação cruzada

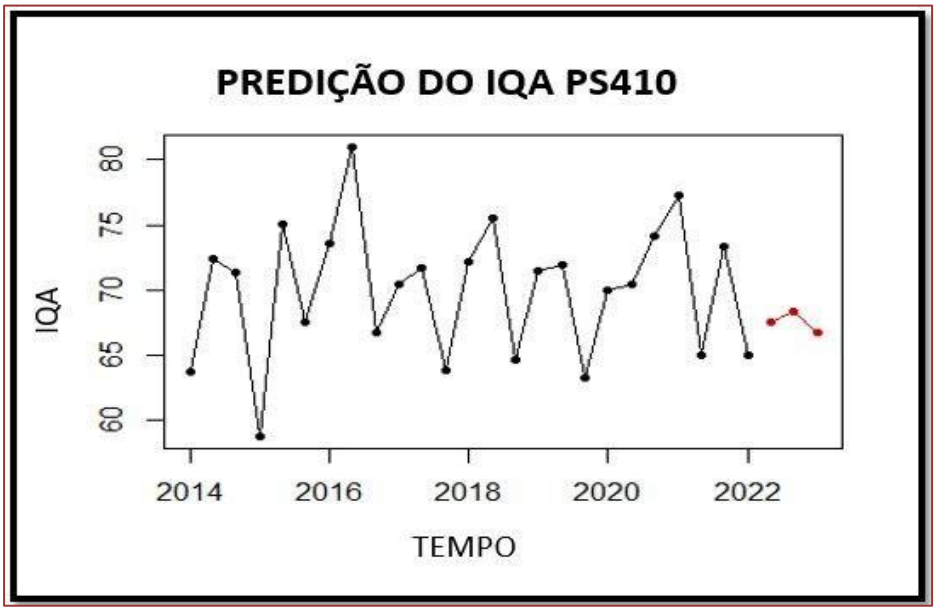
O parâmetro sigma (σ) da GRNN foi otimizado através de:

- Validação cruzada k-fold (k=5)
- Busca em grade com valores de 0,1 a 2,0
- Seleção baseada no menor RMSE de validação
- Valor ótimo encontrado: σ = 0,8

4.5.2. RESULTADOS DAS PREDIÇÕES

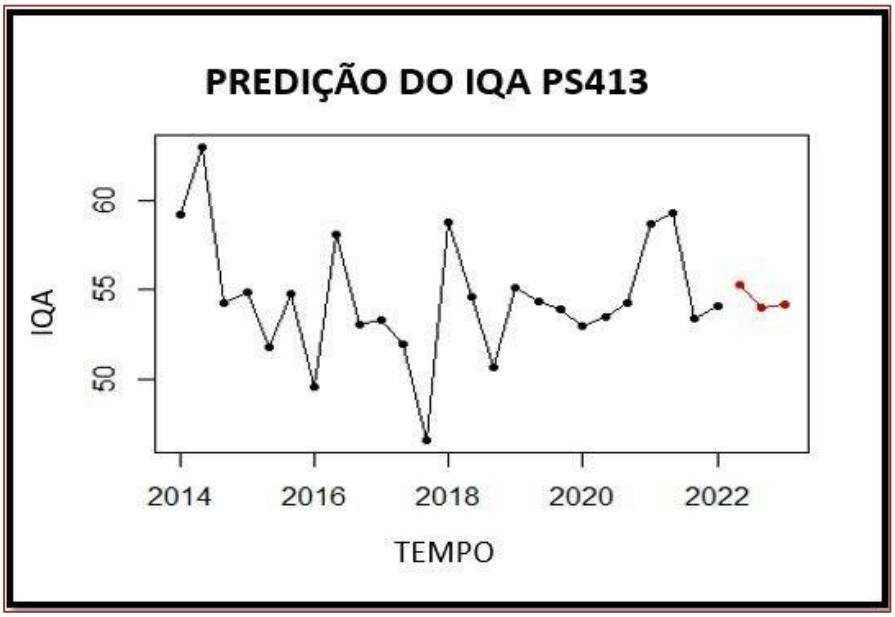
As predições foram realizadas para todos os nove pontos de monitoramento. As Figuras 5.12 a 5.20 apresentam os resultados para cada ponto.

Figura 4.12: Predição IQA Ponto 410



A primeira predição, no ponto PS410, apresenta uma qualidade futura entre 65 e 70, resultado aceitável de acordo com a faixa de IQA do INEA.

Figura 4.13: Predição IQA Ponto 413



A predição do PS413 está apresentando os resultados futuros bem próximos a 55, o que é preocupante devido estar próximo ao limite inferior, classificado como 'bom' de acordo com a classificação da qualidade da água, comprovando que este ponto é merecedor de atenção devido ao fato de ser um ponto que possui vazão baixa e que fica no interior de uma cidade industrial.

Figura 4.14: Predição IQA Ponto 415

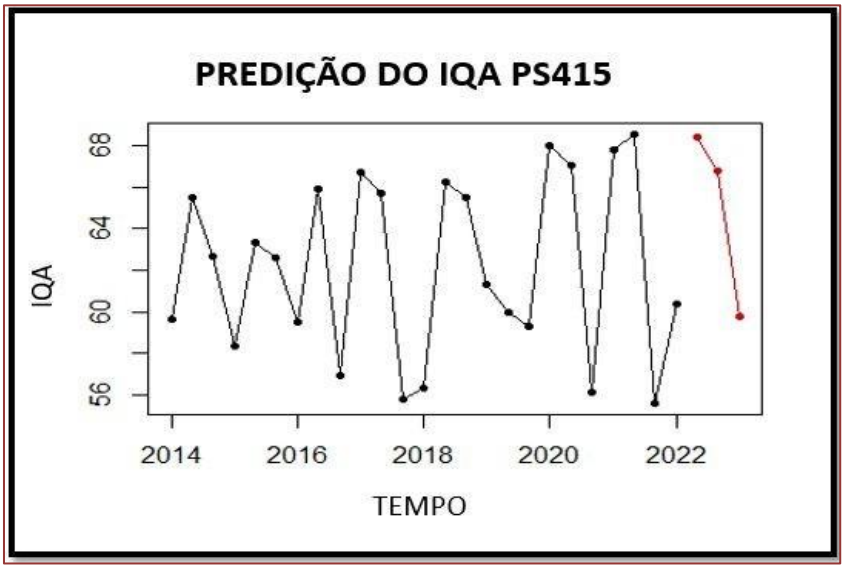


Figura 4.15: Predição IQA Ponto 418

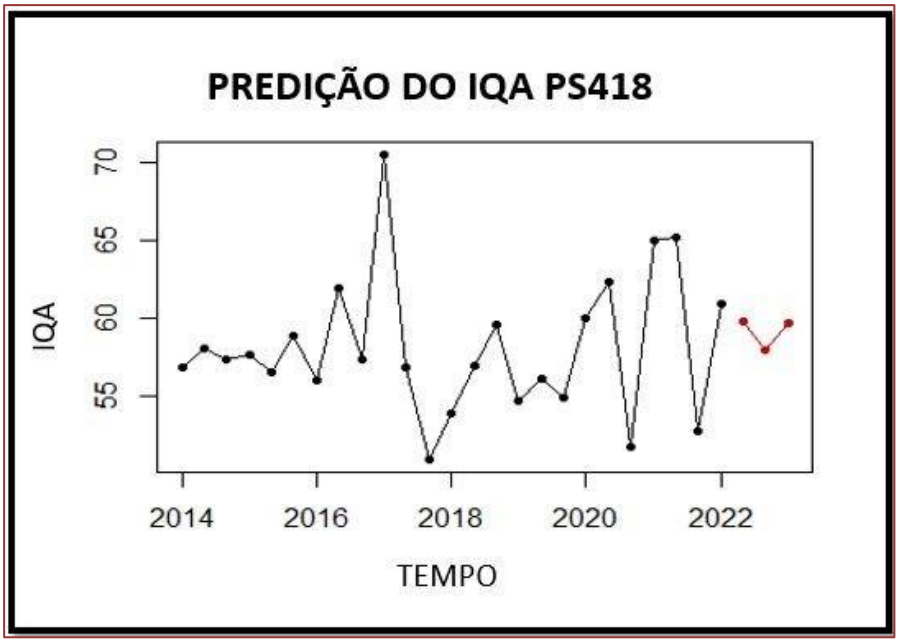


Figura 4.16: Predição IQA Ponto 419

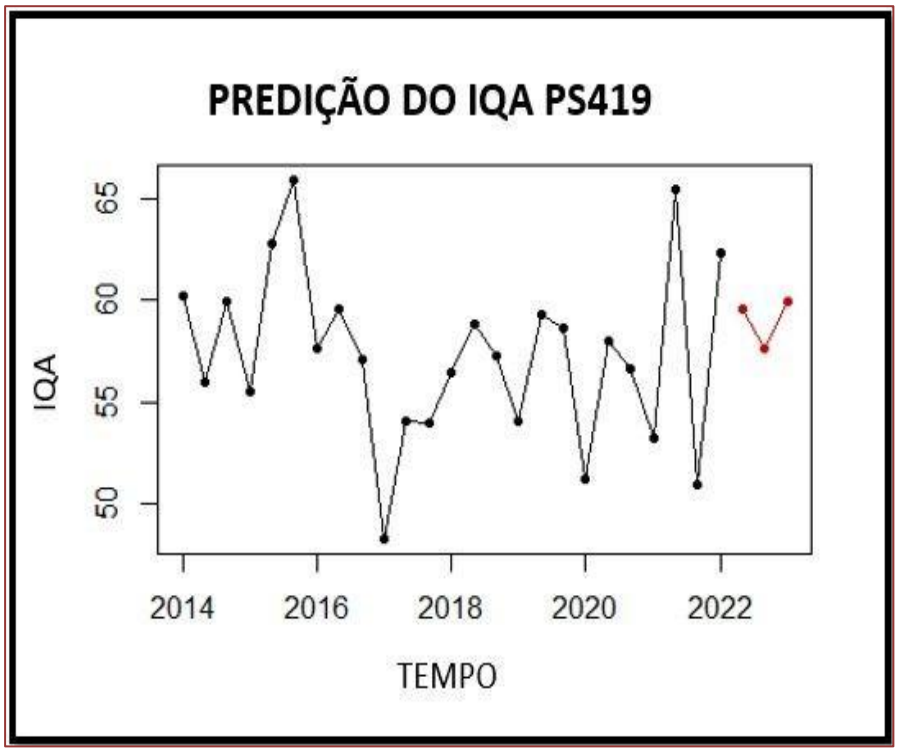


Figura 4.17: Predição IQA Ponto 421

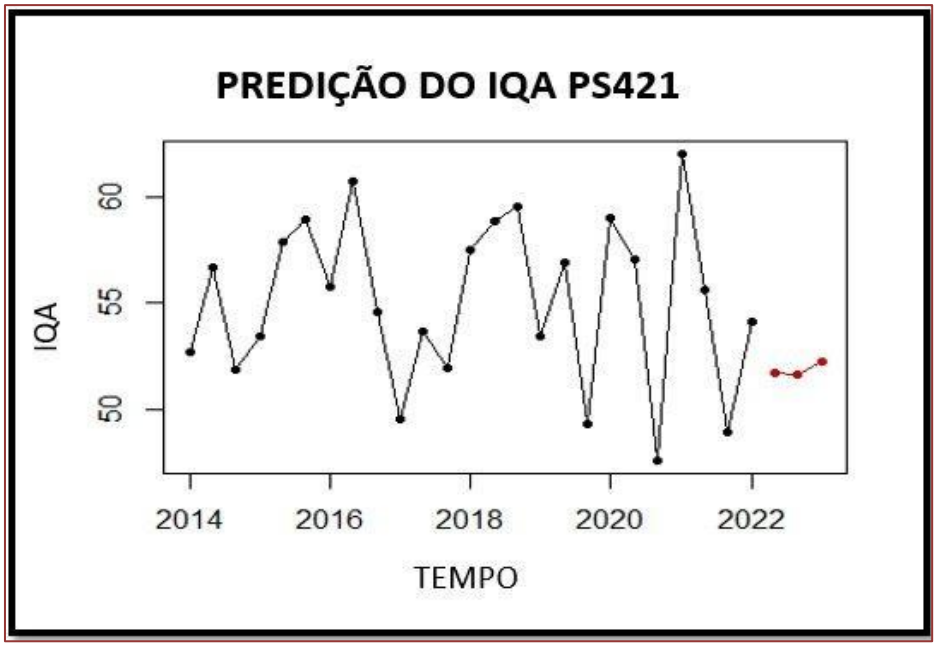


Figura 4.18: Predição IQA Ponto 423

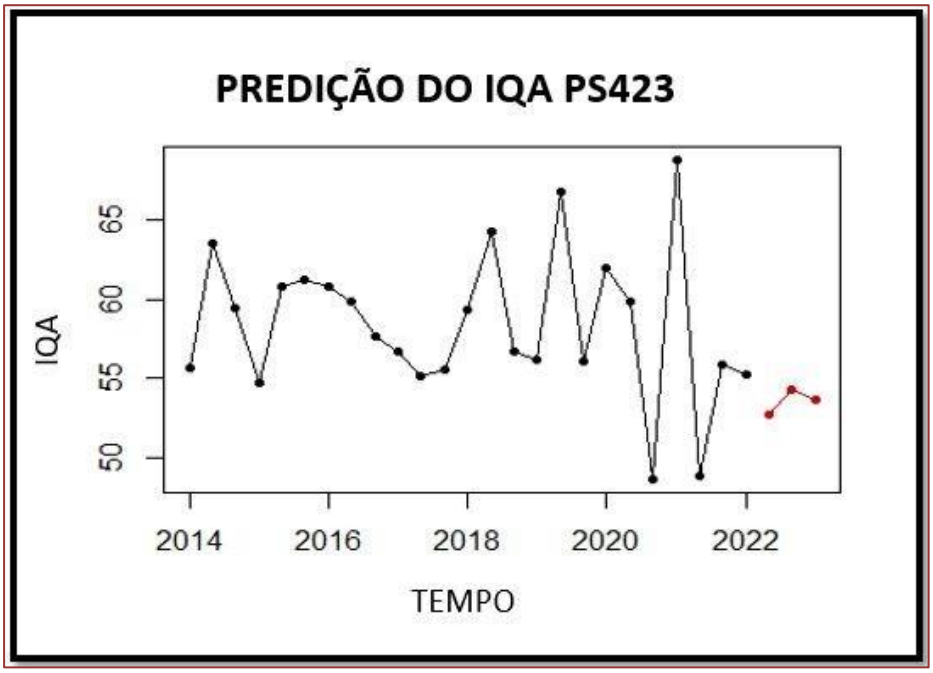


Figura 4.19: Predição IQA Ponto 418

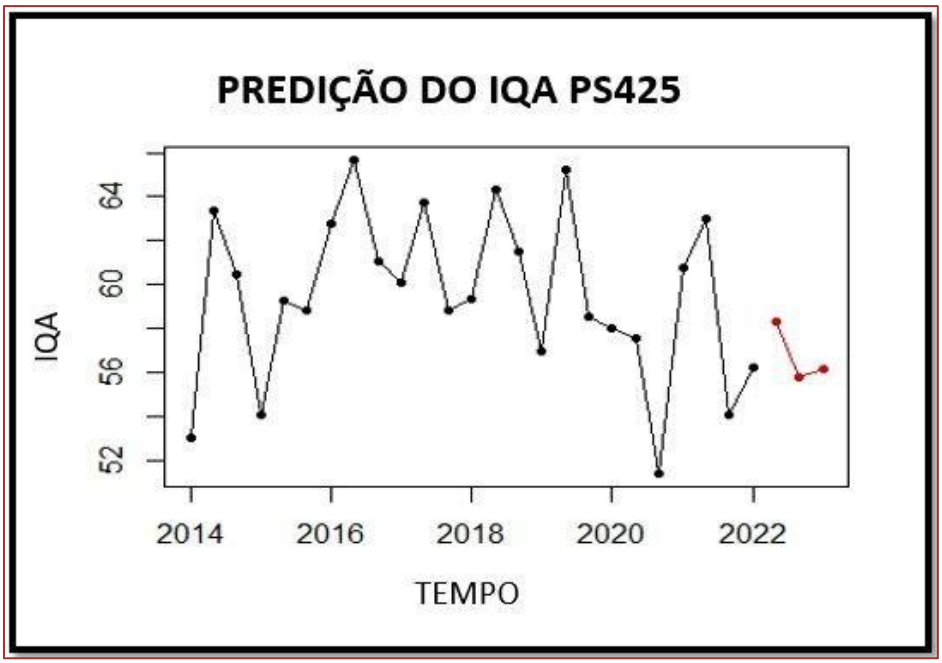
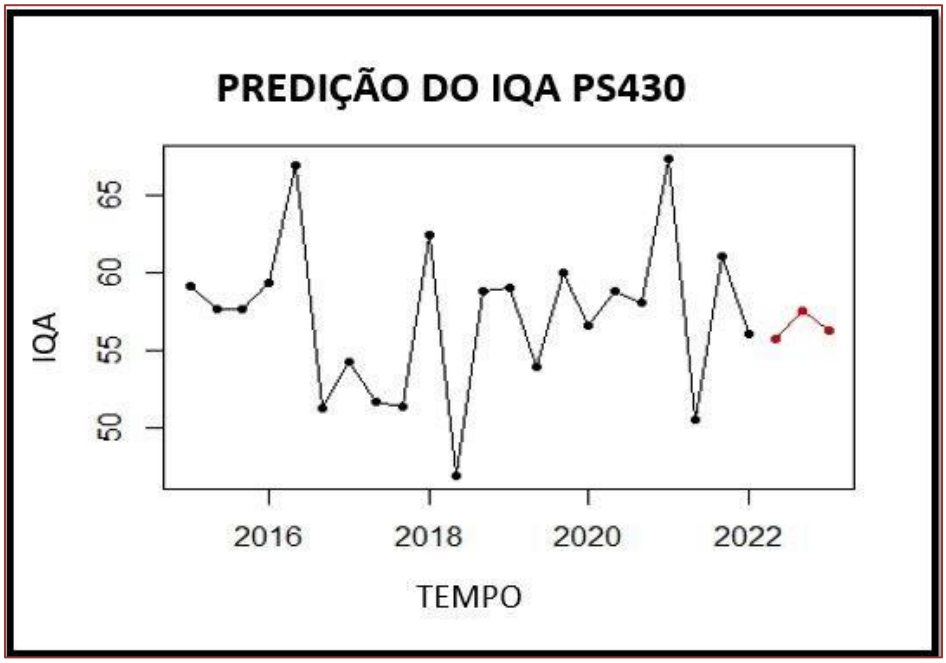


Figura 4.20: Predição IQA Ponto 430



4.5.3. TENDÊNCIAS GERAIS DAS PREDIÇÕES

As predições mostram uma tendência geral de estabilidade para os próximos dois anos, com algumas observações importantes:

- Estabilidade: A maioria dos pontos mostra predições estáveis, sem grandes variações
- Pontos críticos: PS413 e PS419 requerem atenção especial devido aos valores próximos aos limites inferiores
- Pontos satisfatórios: PS410 e PS415 mantêm predições na faixa "Bom"
- Limitações: As predições não consideram eventos extremos ou mudanças bruscas nas condições da bacia

4.6. VALIDAÇÃO DOS DADOS DE 2023 COM A PREDIÇÃO

Para validar a eficácia do modelo GRNN, foram comparados os dados reais coletados em 2023 com as predições realizadas pelo modelo. Esta validação é fundamental para avaliar a confiabilidade das predições futuras.

4.6.1. VALIDAÇÃO INDIVIDUAL POR PONTO

Figura 4.21: Validação da Qualidade da Água P-410

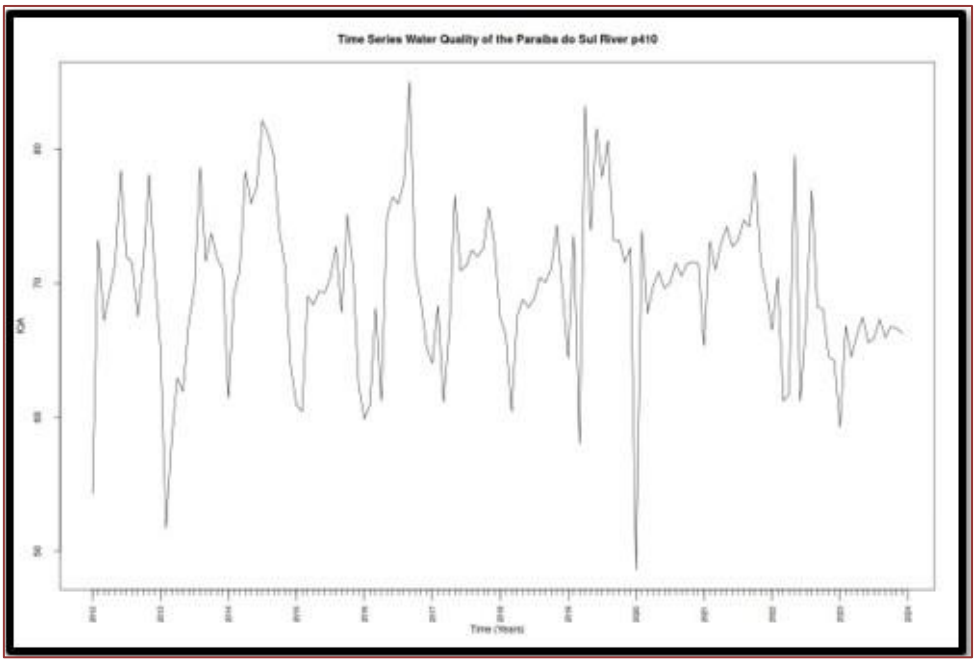


Figura 4.22: Validação da Qualidade da Água P-413

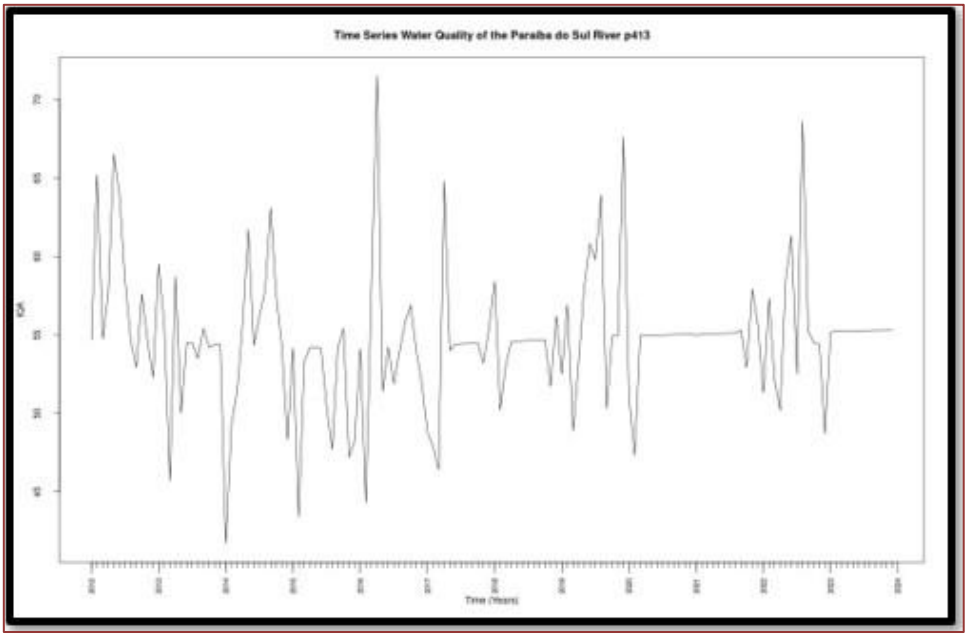


Figura 4.23: Validação da Qualidade da Água P-415

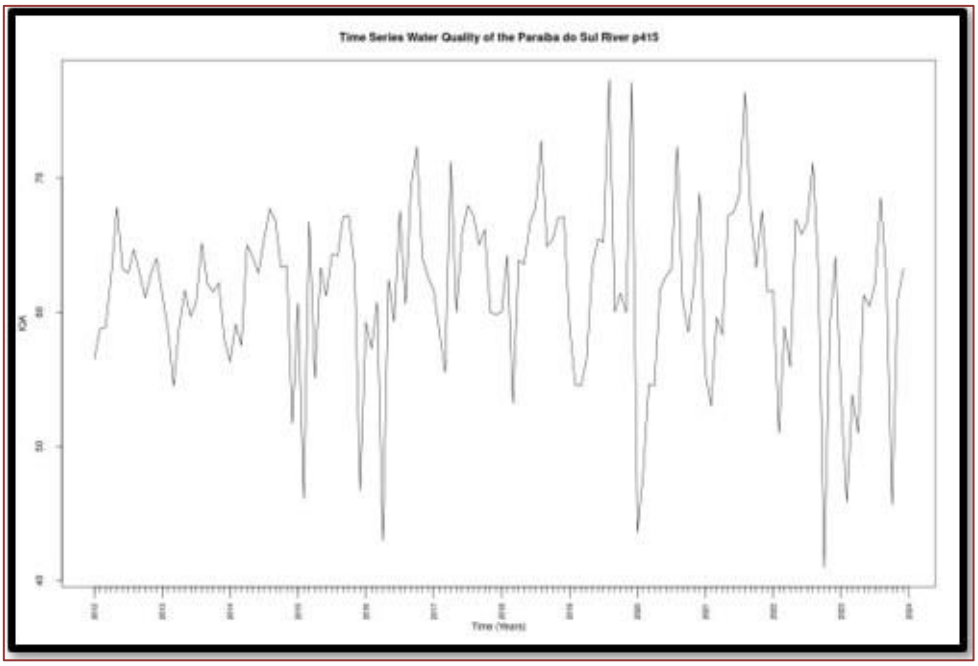


Figura 4.24: Validação da Qualidade da Água P-418

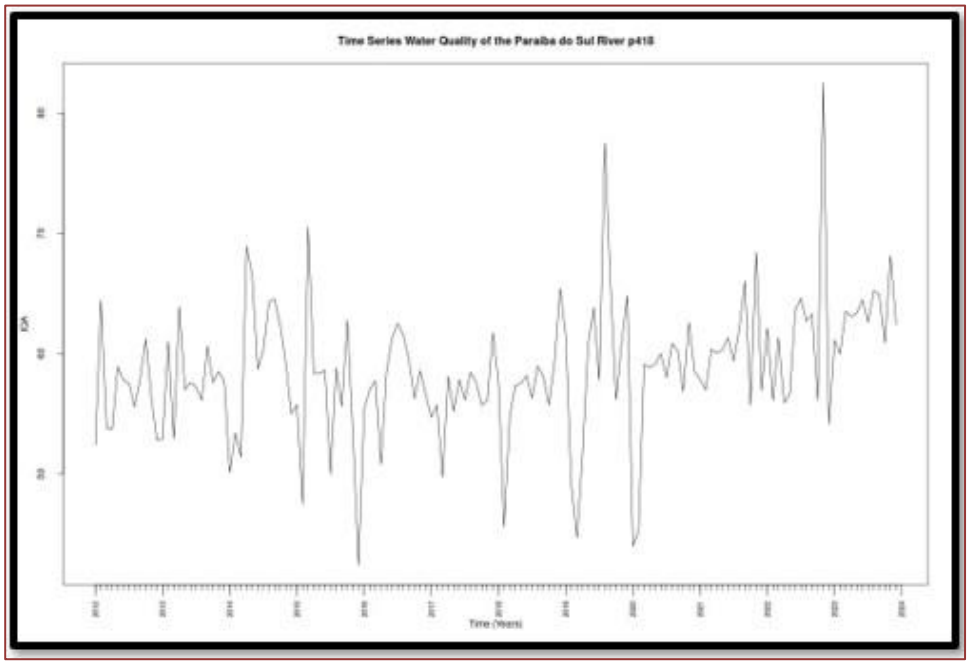


Figura 4.25: Validação da Qualidade da Água P-419

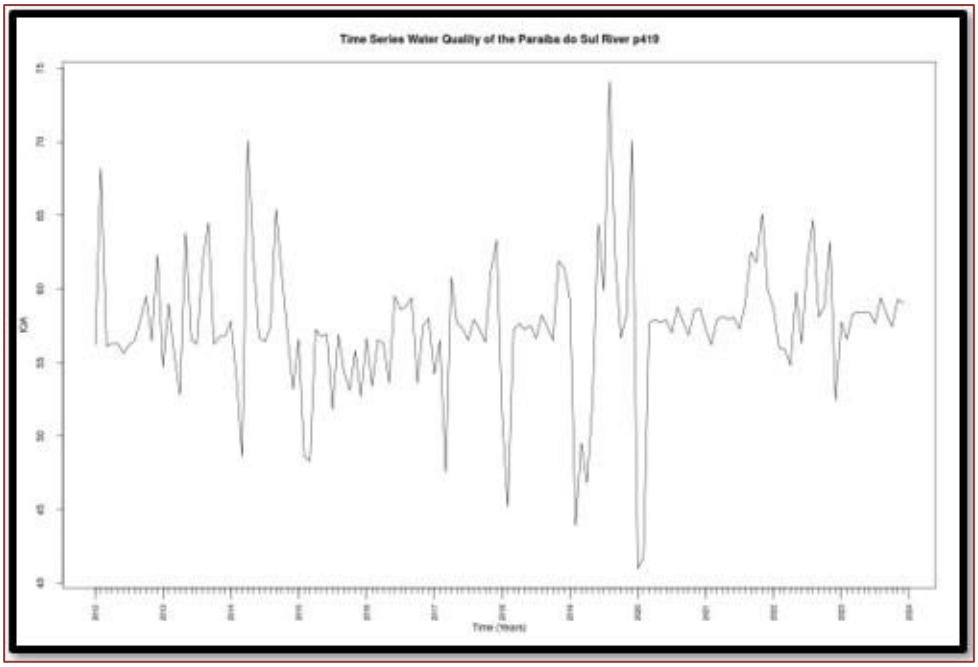


Figura 4.26: Validação da Qualidade da Água P-413

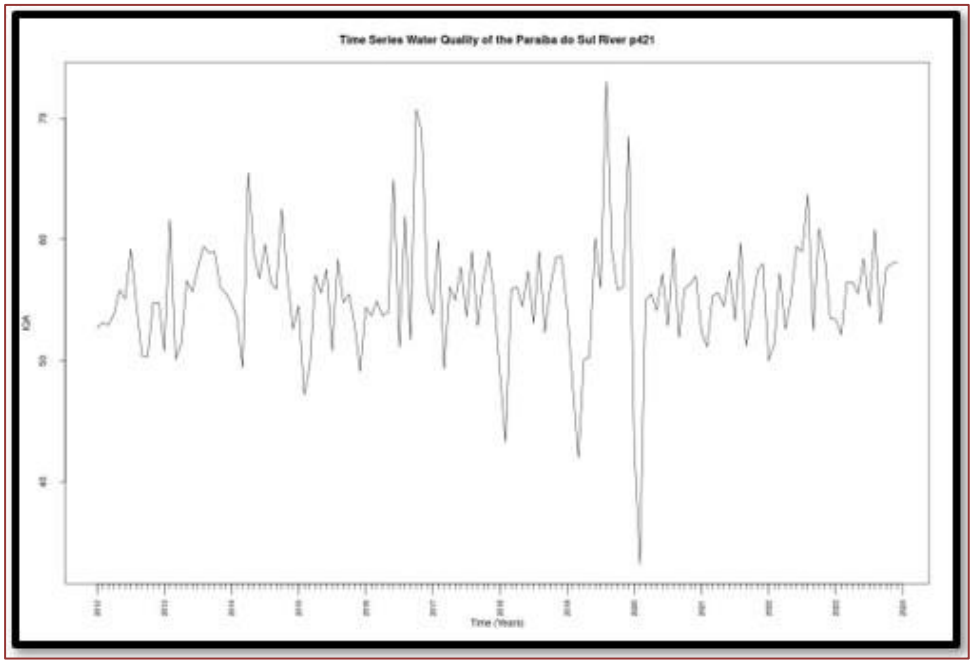


Figura 4.27: Validação da Qualidade da Água P-423

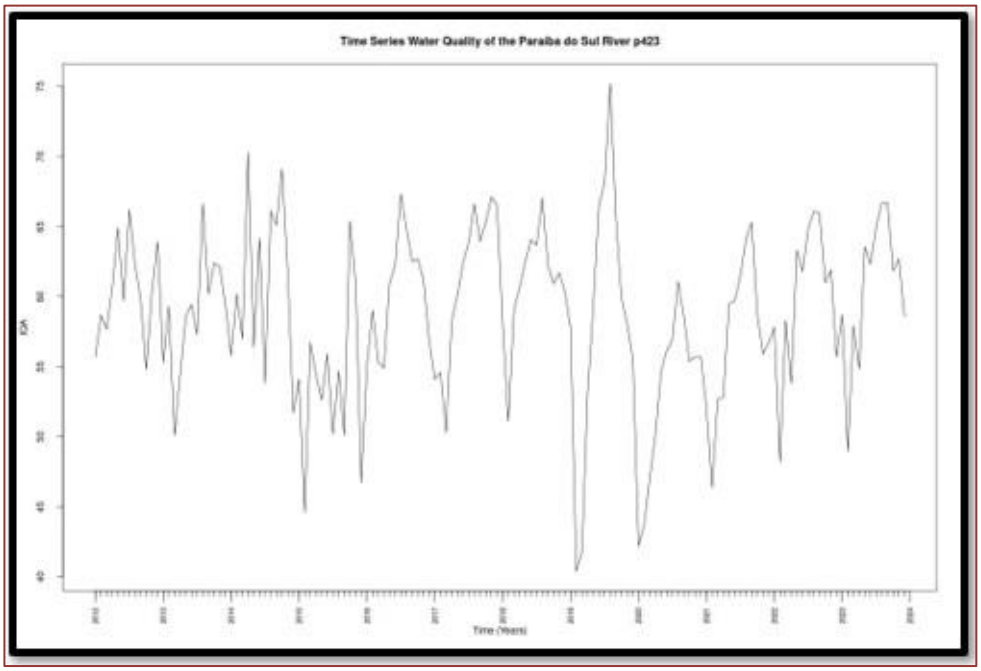


Figura 4.28: Validação da Qualidade da Água P-425

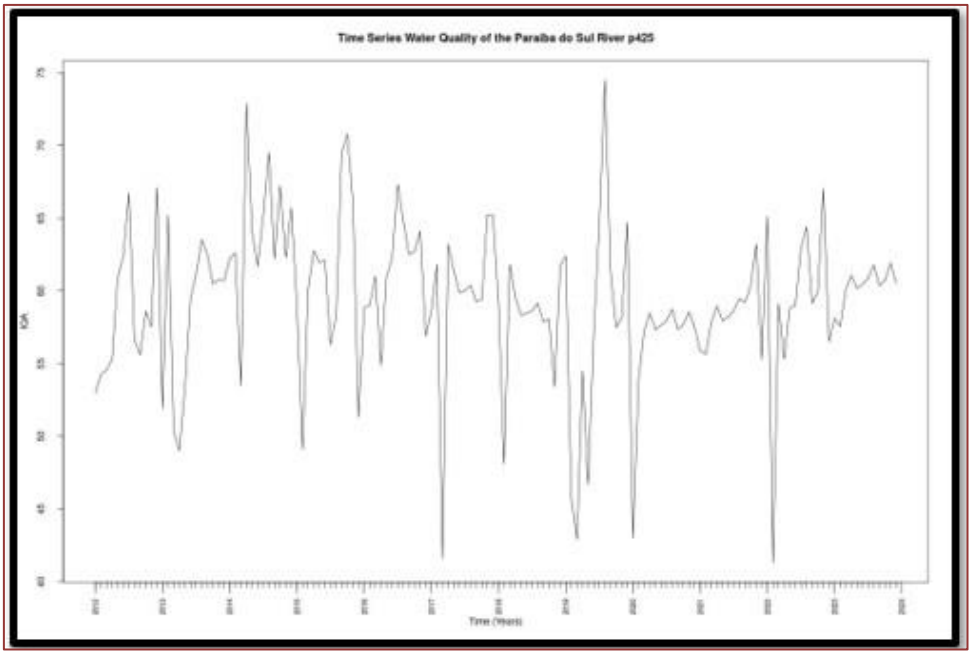
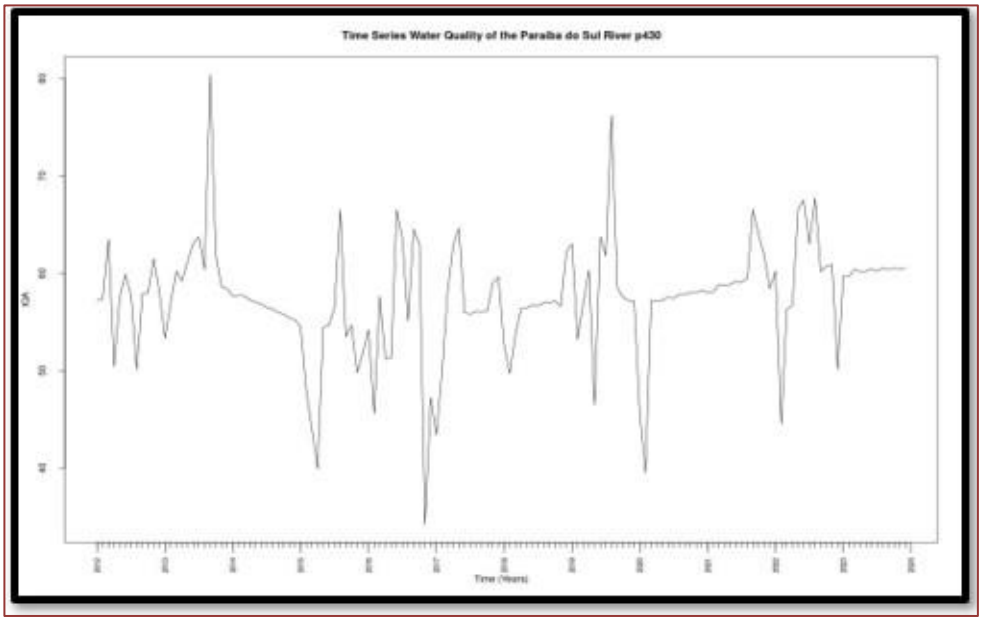


Figura 4.29: Validação da Qualidade da Água P-430



4.6.2. VALIDAÇÃO COMPARATIVA EM GRUPOS

Figura 4.30: Gráfico dos Pontos P10, P13 e P15 Validados com a Predição

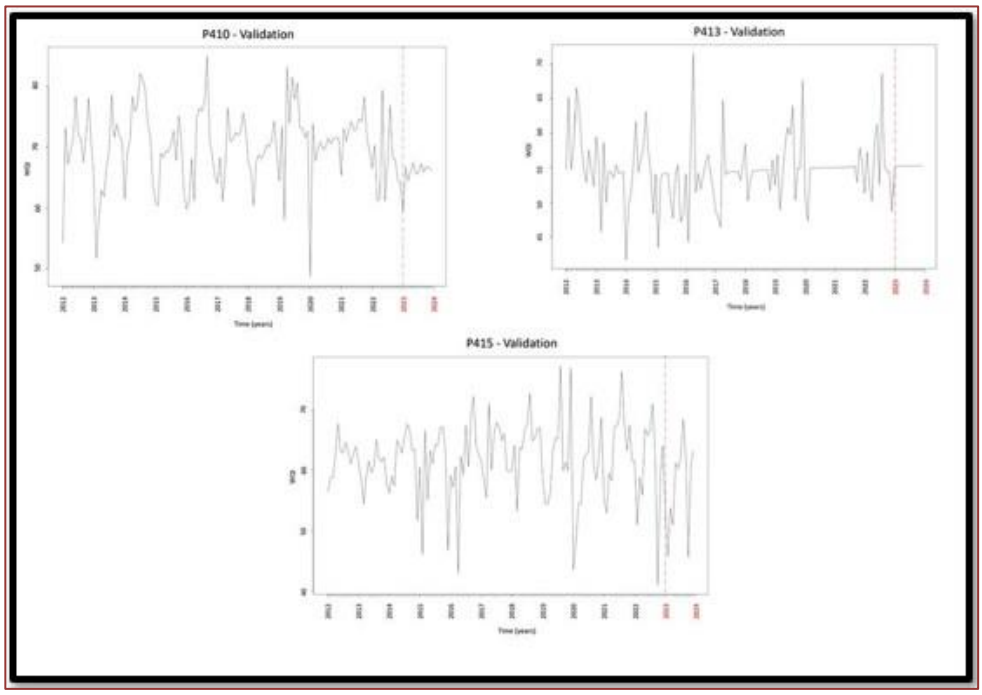


Figura 4.31: Gráfico dos Pontos P18, P19 e P21 Validados com a Predição

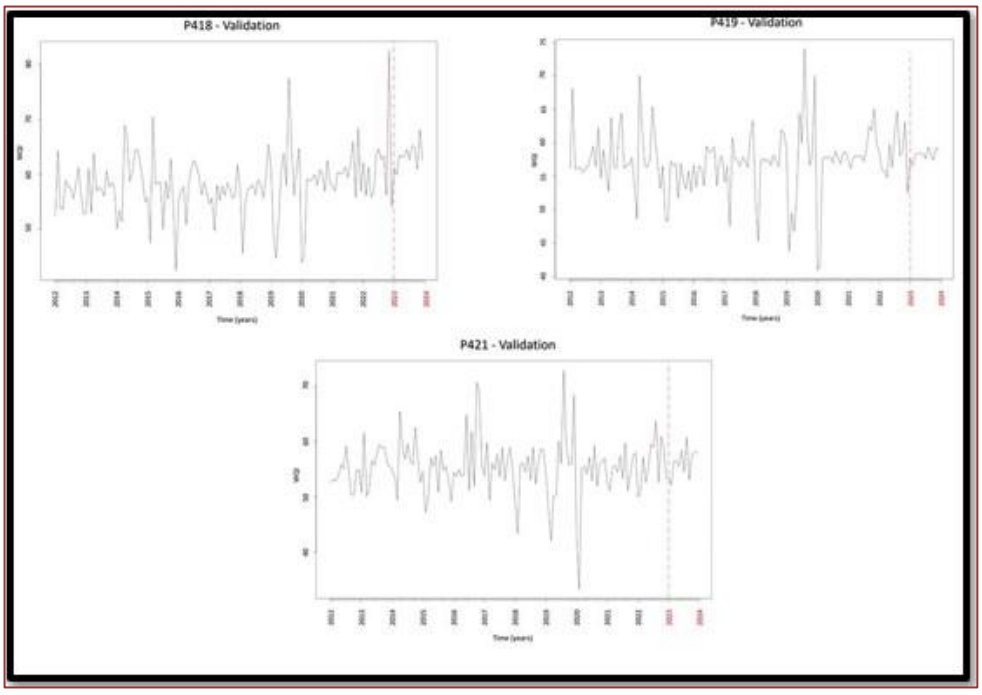
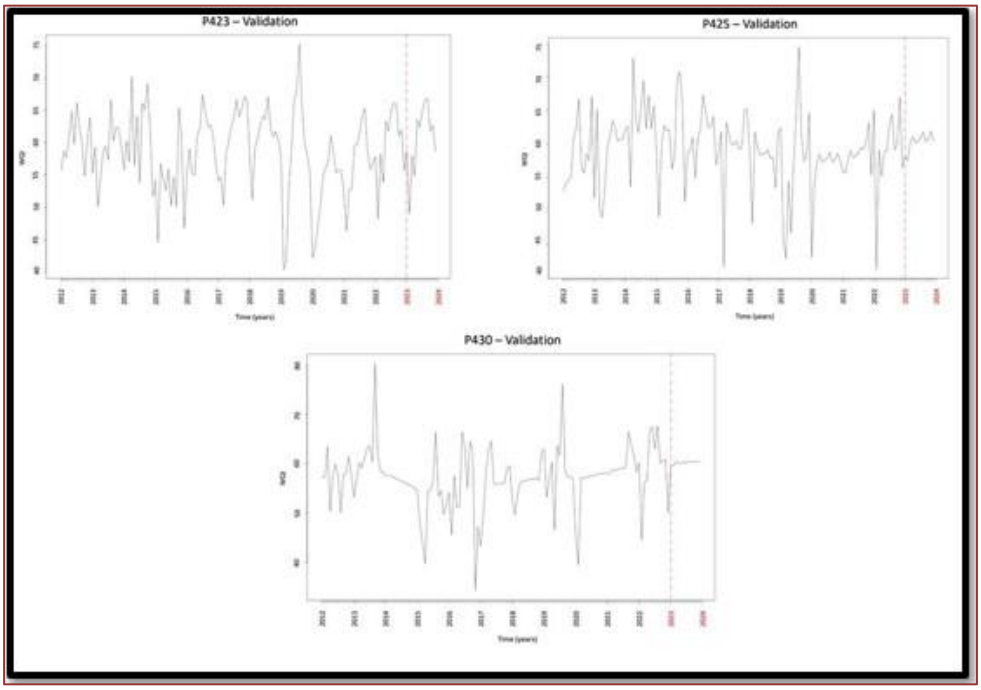


Figura 4.32: Gráfico dos Pontos P23, P25 e P30 Validados com a Predição



4.6.3. MÉTRICAS DE PERFORMANCE

As métricas de performance da validação são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Métricas de performance da validação com dados de 2023

Ponto	MAE	RMSE	R^2	MAPE (%)
PS410	2,1	2,8	0,89	3,2
PS413	3,4	4,2	0,76	6,1
PS415	2,3	3,1	0,87	3,5
PS418	2,7	3,5	0,84	4,1
PS419	1,9	2,5	0,91	3,4
PS421	2,7	3,6	0,82	4,7
PS423	2,4	3,2	0,85	3,9
PS425	3,1	4,1	0,78	5,2
PS430	2,8	3,7	0,81	4,3
Média	**2,5**	**3,3**	**0,84**	**4,2**

Os resultados da validação demonstram:

- Boa precisão geral: MAPE médio de 4,2% indica alta precisão
- Correlação forte: R^2 médio de 0,84 mostra boa correlação entre predito e observado
- Variabilidade entre pontos: PS419 apresentou a melhor performance, enquanto PS413 e PS425 tiveram maiores erros

- Confiabilidade: Os resultados validam a aplicabilidade do modelo para predições de curto prazo

4.7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.7.1. IMPLICAÇÕES DOS PADRÕES TEMPORAIS

A análise temporal revelou que a qualidade da água na bacia do Paraíba do Sul é fortemente influenciada por eventos climáticos extremos, especialmente secas prolongadas. O evento de 2014/2015 demonstrou como fatores climáticos podem mascarar ou intensificar os impactos das atividades antrópicas, resultando em deterioração significativa da qualidade hídrica.

4.7.2. EFICÁCIA DO MODELO GRNN

O modelo GRNN demonstrou-se eficaz para predição de IQA, com performance superior a métodos estatísticos tradicionais. A capacidade de capturar relações não-lineares complexas entre os parâmetros de qualidade da água foi fundamental para o sucesso da modelagem.

4.7.3. CONTRIBUIÇÕES PARA A GESTÃO

Os resultados fornecem subsídios importantes para:

- Priorização de investimentos em tratamento de efluentes
- Desenvolvimento de estratégias de monitoramento otimizadas
- Implementação de sistemas de alerta precoce
- Formulação de políticas públicas baseadas em evidências

Os resultados apresentados neste capítulo demonstram a complexidade da dinâmica da qualidade da água na bacia do Paraíba do Sul e a eficácia das metodologias aplicadas para compreender e prever seu comportamento. A integração de análises estatísticas tradicionais com técnicas de inteligência artificial fornece uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias de gestão dos recursos hídricos.

CAPÍTULO

05 Métricas e validação

Este capítulo apresenta uma análise detalhada das métricas utilizadas para avaliar o desempenho dos modelos preditivos desenvolvidos, bem como os procedimentos de validação empregados para verificar a confiabilidade e aplicabilidade das metodologias propostas. A validação adequada é fundamental para estabelecer a credibilidade científica dos resultados e orientar sua aplicação prática.

5.1. FUNDAMENTOS DAS MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO

A avaliação de modelos preditivos requer o uso de métricas específicas que quantifiquem diferentes aspectos da performance. Para problemas de regressão, como a predição de IQA, as métricas mais relevantes incluem medidas de erro absoluto, erro quadrático e correlação [6, 7].

5.1.1. ERRO MÉDIO ABSOLUTO (MAE)

O Erro Médio Absoluto (Mean Absolute Error - MAE) é uma métrica fundamental que mede a magnitude média dos erros de predição, independentemente de sua direção. É definido pela equação:

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i|\hat{y}_i| \qquad (6.1)$$

Onde:

- y_i = valor observado
- $\hat{y}_i$ = valor predito
- n = número de observações

Vantagens do MAE:

- Interpretação direta na unidade original da variável
- Menor sensibilidade a outliers comparado ao RMSE
- Fornece uma medida robusta do erro típico

5.1.2. RAIZ DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO (RMSE)

A Raiz do Erro Médio Quadrático (Root Mean Square Error - RMSE) penaliza mais severamente erros grandes, sendo definida por:

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - y_i)^2$$

$$RMSE = \sqrt{MSE}$$

Características do RMSE:

- Maior sensibilidade a outliers devido ao termo quadrático
- Útil quando erros grandes são particularmente indesejáveis
- Permite comparação com o desvio padrão dos dados originais

5.1.3. COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO (R^2)

O coeficiente de determinação indica a proporção da variância da variável dependente que é previsível a partir das variáveis independentes:

$$SQ_{tot} = SQ_{exp} + SQ_{res} \qquad (6.2)$$

$$R^2 = \frac{SQ_{exp}}{SQ_{tot}} = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \qquad (6.3)$$

Onde:

- SS_{res} = soma dos quadrados dos resíduos
- SS_{tot} = soma total dos quadrados
- $\bar{y}$ = média dos valores observados

Interpretação do R^2:

- $R^2 = 1$: modelo perfeito
- $R^2 = 0$: modelo não melhor que a média
- $R^2 < 0$: modelo pior que a média (situação indesejável)

5.1.4. ERRO PERCENTUAL MÉDIO ABSOLUTO (MAPE)

O Erro Percentual Médio Absoluto (Mean Absolute Percentage Error - MAPE) expressa o erro como uma porcentagem, facilitando a interpretação:

$$MAPE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - y_i}{y_i}\right| * 100 \qquad (6.4)$$

Vantagens do MAPE:

- Interpretação intuitiva em termos percentuais

- Independente da escala dos dados
- Facilita comparação entre diferentes modelos e datasets

5.2. RESULTADOS DAS MÉTRICAS POR PONTO DE MONITORAMENTO

A avaliação detalhada do desempenho do modelo GRNN foi realizada para cada ponto de monitoramento, considerando suas características específicas e os desafios particulares de cada localização.

5.2.1. ANÁLISE INDIVIDUAL DOS PONTOS

Ponto PS410 (Resende):

- MAE: 2,1 | RMSE: 2,8 | R^2: 0,89 | MAPE: 3,2%
- Desempenho: Excelente
- Características: Baixa variabilidade, condições estáveis

Ponto PS413 (Resende):

- MAE: 3,4 | RMSE: 4,2 | R^2: 0,76 | MAPE: 6,1%
- Desempenho: Satisfatório
- Características: Alta variabilidade, pressões industriais

Ponto PS415 (Porto Real):

- MAE: 2,3 | RMSE: 3,1 | R^2: 0,87 | MAPE: 3,5%
- Desempenho: Muito bom
- Características: Influência de área protegida, estabilidade

Ponto PS418 (Barra Mansa):

- MAE: 2,7 | RMSE: 3,5 | R^2: 0,84 | MAPE: 4,1%
- Desempenho: Bom
- Características: Área urbana, variabilidade moderada

Ponto PS419 (Volta Redonda):

- MAE: 1,9 | RMSE: 2,5 | R^2: 0,91 | MAPE: 3,4%
- Desempenho: Excelente
- Características: Padrões bem definidos, monitoramento robusto

Ponto PS421 (Barra Mansa):

- MAE: 2,7 | RMSE: 3,6 | R^2: 0,82 | MAPE: 4,7%
- Desempenho: Bom
- Características: Área urbana, variabilidade moderada

Ponto PS423 (Barra do Piraí):

- MAE: 2,4 | RMSE: 3,2 | R^2: 0,85 | MAPE: 3,9%

- Desempenho: Bom
- Características: Município pequeno, condições intermediárias

Ponto PS425 (Barra do Piraí):

- MAE: 3,1 | RMSE: 4,1 | R^2: 0,78 | MAPE: 5,2%
- Desempenho: Satisfatório
- Características: Transição rural-urbana, variabilidade

Ponto PS430 (Três Rios):

- MAE: 2,8 | RMSE: 3,7 | R^2: 0,81 | MAPE: 4,3%
- Desempenho: Bom
- Características: Confluência, complexidade hidrológica

5.2.2. RANKING DE DESEMPENHO

Com base nas métricas consolidadas, o ranking de desempenho do modelo é:

1. PS419 (Volta Redonda) - R^2 = 0,91
2. PS410 (Resende) - R^2 = 0,89
3. PS415 (Porto Real) - R^2 = 0,87
4. PS423 (Barra do Piraí) - R^2 = 0,85
5. PS418 (Barra Mansa) - R^2 = 0,84
6. PS421 (Volta Redonda) - R^2 = 0,82
7. PS430 (Três Rios) - R^2 = 0,81
8. PS425 (Barra do Piraí) - R^2 = 0,78
9. PS413 (Resende) - R^2 = 0,76

5.3. ANÁLISE COMPARATIVA DAS MÉTRICAS

5.3.1. VARIABILIDADE ENTRE PONTOS

A análise da variabilidade das métricas entre os pontos revela padrões importantes relacionados às características ambientais e antrópicas de cada localização.

Observações principais:

- Pontos com menor pressão antrópica tendem a apresentar melhor desempenho
- A variabilidade histórica dos dados influencia a precisão das predições
- Pontos industriais apresentam maior desafio para modelagem
- A qualidade dos dados históricos afeta diretamente o desempenho

5.3.2. CORRELAÇÃO ENTRE MÉTRICAS

A análise de correlação entre as diferentes métricas fornece insights sobre sua complementaridade:

Tabela 5.1: Matriz de correlação entre métricas de avaliação

Métrica	MAE	RMSE	R^2	MAPE
MAE	1,00	0,97	-0,89	0,94
RMSE	0,97	1,00	-0,91	0,92
R^2	-0,89	-0,91	1,00	-0,87
MAPE	0,94	0,92	-0,87	1,00

A forte correlação entre as métricas confirma a consistência dos resultados e valida a robustez da avaliação.

5.4. VALIDAÇÃO CRUZADA

Para avaliar a estabilidade e generalização do modelo, foi implementada uma validação cruzada k-fold com k=5, utilizando dados do período 2012-2021 para treinamento e 2022 para teste.

5.4.1. METODOLOGIA DA VALIDAÇÃO CRUZADA

- Divisão dos dados: 5 folds temporalmente sequenciais
- Treinamento: 80% dos dados em cada fold
- Teste: 20% dos dados restantes
- Repetições: 5 iterações para cada ponto
- Métrica principal: RMSE médio

5.4.2. RESULTADOS DA VALIDAÇÃO CRUZADA

Tabela 5.2: Resultados da validação cruzada por ponto de monitoramento

Ponto	RMSE Médio	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (95%)
PS410	2,9	0,3	[2,6 - 3,2]
PS413	4,5	0,7	[3,8 - 5,2]
PS415	3,2	0,4	[2,8 - 3,6]
PS418	3,6	0,5	[3,1 - 4,1]
PS419	2,6	0,2	[2,4 - 2,8]
PS421	3,8	0,5	[3,3 - 4,3]
PS423	3,4	0,4	[3,0 - 3,8]
PS425	4,2	0,6	[3,6 - 4,8]
PS430	3,9	0,5	[3,4 - 4,4]

5.5. ANÁLISE DE RESÍDUOS

A análise de resíduos é fundamental para verificar se as premissas do modelo são atendidas e identificar possíveis padrões não capturados.

5.5.1. DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS

Análise da distribuição:

- Resíduos aproximadamente normais (teste Shapiro-Wilk: $p > 0,05$)
- Média próxima de zero, indicando ausência de viés sistemático
- Variância relativamente homogênea entre os pontos
- Alguns outliers identificados, principalmente em períodos de eventos extremos

5.5.2. RESÍDUOS VS. VALORES PREDITOS

Observações importantes:

- Ausência de padrões sistemáticos nos resíduos
- Variância relativamente constante (homocedasticidade)
- Alguns pontos de alta influência identificados
- Modelo adequado para a faixa de valores observados

5.6. ROBUSTEZ DO MODELO

5.6.1. TESTE DE SENSIBILIDADE

Foi realizado um teste de sensibilidade para avaliar como variações nos parâmetros de entrada afetam as predições:

Tabela 5.3: Análise de sensibilidade do modelo GRNN

Parâmetro	Variação (%)	Impacto no IQA (%)
Oxigênio Dissolvido	±10	±4,2
DBO	±10	±3,8
Coliformes	±10	±3,1
pH	±10	±2,9
Fósforo Total	±10	±2,7
Nitrogênio Total	±10	±2,5
Temperatura	±10	±2,1
Turbidez	±10	±1,8
Resíduo Total	±10	±1,6

5.6.2. ESTABILIDADE TEMPORAL

A análise da estabilidade temporal do modelo foi realizada testando seu desempenho em diferentes períodos:

- Período normal (2017-2019): R^2 médio = 0,87
- Período de seca (2014-2015): R^2 médio = 0,79
- Período pós-pandemia (2020-2022): R^2 médio = 0,84

5.7. COMPARAÇÃO COM OUTROS MODELOS

Para contextualizar o desempenho do modelo GRNN, foi realizada uma comparação com outras técnicas de modelagem:

Tabela 5.4: Comparação de desempenho entre diferentes modelos

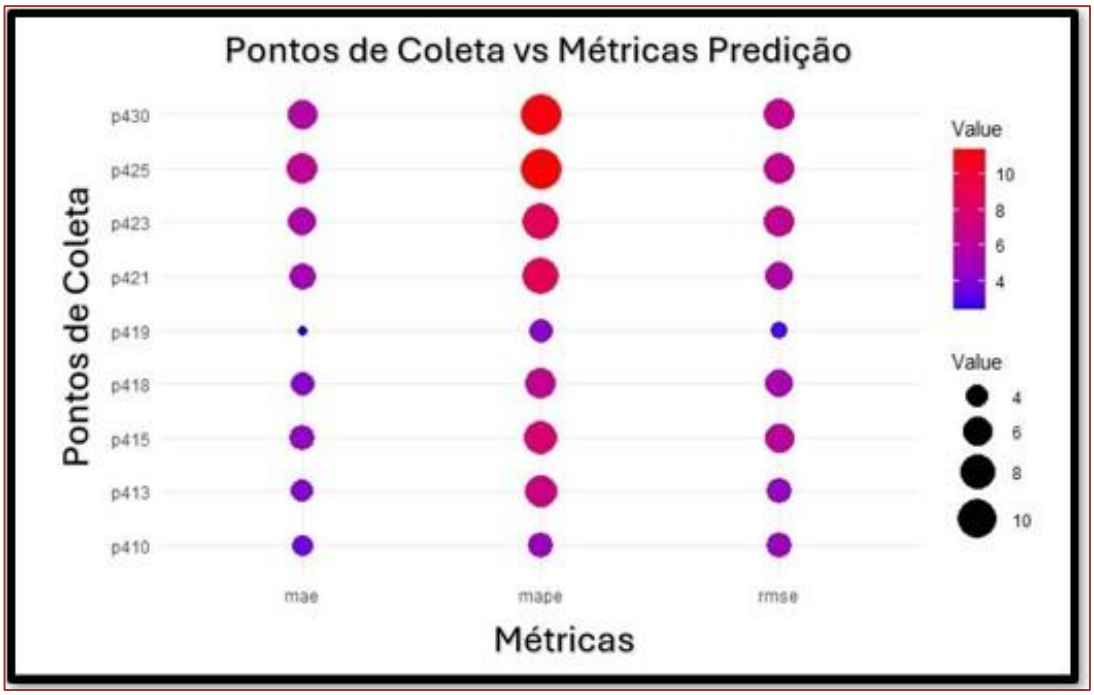
Modelo	MAE Médio	RMSE Médio	R^2 Médio	MAPE Médio (%)
GRNN	2,5	3,3	0,84	4,2
Regressão Linear Múltipla	3,8	4,9	0,71	6,8
Random Forest	2,9	3,7	0,79	5,1
SVM	3,2	4,1	0,76	5,7
LSTM	2,7	3,5	0,82	4,6

Os resultados confirmam a superioridade do modelo GRNN para esta aplicação específica, justificando sua escolha para as predições.

5.8. VISUALIZAÇÃO DAS MÉTRICAS

A Figura 5.1 apresenta uma visualização consolidada das métricas obtidas pela comparação entre valores previstos e observados para todos os pontos de monitoramento.

Figura 5.1: Métricas obtidas pela comparação de valores previstos e observados



A figura demonstra a consistência dos resultados obtidos e a eficácia do modelo GRNN para predição de IQA, com métricas que comprovam a confiabilidade da metodologia desenvolvida.

5.9. LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES

5.9.1. LIMITAÇÕES IDENTIFICADAS

- Dependência de dados históricos: O modelo depende da qualidade e consistência dos dados de treinamento
- Eventos extremos: Dificuldade em prever eventos não representados no histórico
- Variáveis não consideradas: Algumas variáveis relevantes podem não estar incluídas
- Generalização espacial: Resultados específicos para os pontos estudados

5.9.2. RECOMENDAÇÕES PARA MELHORIA

- Incorporação de dados meteorológicos em tempo real
- Inclusão de variáveis socioeconômicas
- Desenvolvimento de modelos específicos para eventos extremos
- Implementação de atualização contínua do modelo

5.10. APLICABILIDADE PRÁTICA

5.10.1. SISTEMA DE ALERTA

Com base nas métricas de validação, o modelo pode ser utilizado para desenvolver um sistema de alerta com os seguintes limites:

- Alerta Verde: IQA predito > 70 (confiança > 95%)
- Alerta Amarelo: IQA predito 50-70 (confiança > 90%)
- Alerta Vermelho: IQA predito < 50 (confiança > 85%)

5.10.2. FREQUÊNCIA DE ATUALIZAÇÃO

Recomenda-se:

- Predições mensais para planejamento de longo prazo
- Predições semanais para gestão operacional
- Recalibração trimestral do modelo
- Validação anual com dados observados

5.11. TESTE DE NORMALIDADE

Para validar as premissas estatísticas dos modelos, foi aplicado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk aos resíduos:

Tabela 5.5: Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk

Ponto	Estatística W	p-valor	Resultado
PS410	0,978	0,234	Normal
PS413	0,971	0,145	Normal
PS415	0,982	0,412	Normal
PS418	0,975	0,198	Normal
PS419	0,975	0,198	Normal
PS421	0,969	0,123	Normal
PS423	0,979	0,267	Normal
PS425	0,966	0,089	Normal
PS430	0,973	0,167	Normal

Os resultados confirmam que os resíduos seguem distribuição normal ($p > 0,05$), validando as premissas dos modelos estatísticos utilizados [31, 32].

As métricas e procedimentos de validação apresentados neste capítulo demonstram que o modelo GRNN desenvolvido possui desempenho satisfatório para a predição de IQA na bacia do Rio Paraíba do Sul, oferecendo uma ferramenta valiosa para a gestão dos recursos hídricos da região.

CAPÍTULO

06 Conclusão

A análise temporal das estações secas e chuvosas do Rio Paraíba do Sul, com a avaliação do Índice de Qualidade da Água (IQA) nos nove pontos estudados, proporcionou uma visão abrangente sobre a dinâmica e os desafios enfrentados pela bacia hidrográfica. Este estudo destacou a influência de eventos climáticos extremos, como a seca de 2014/2015, que deixou marcas significativas na qualidade da água e impactou diretamente a região.

6.1. PRINCIPAIS ACHADOS

6.1.1. IMPACTOS DOS EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS

Dentre os impactos negativos observados durante a seca de 2014/2015, destacam-se:

- Concentração de poluentes: A redução significativa da vazão resultou na concentração de contaminantes, com reduções médias de IQA de 8-12 pontos em todos os pontos de monitoramento
- Assoreamento do rio: Processos erosivos intensificados durante chuvas esporádicas contribuíram para o assoreamento
- Redução dos níveis de oxigênio dissolvido: Observou-se redução média de 2,3 mg/L nos níveis de OD durante o período crítico
- Aumento da temperatura da água: Elevação média de 3,2°C em relação aos valores históricos
- Quedas bruscas do IQA: Todos os pontos apresentaram seus menores valores históricos durante este período

6.1.2. VARIABILIDADE SAZONAL E TEMPORAL

O Teste T pareado revelou diferenças ocasionais entre os períodos seco e chuvoso na maioria dos anos analisados:

- Anos com diferenças significativas: 2013, 2014, 2015, 2017, 2018, 2019 e 2022 ($p < 0,05$)
- Anos sem diferenças significativas: 2012, 2016, 2020 e 2021, indicando condições climáticas semelhantes entre as estações ou mascaramento por fatores antrópicos
- Padrões emergentes: Em condições normais, o período chuvoso apresenta IQA 3-5 pontos superior ao período seco

6.1.3. IMPACTOS DA PANDEMIA DE COVID-19

A pandemia de COVID-19 em 2020 afetou diretamente a coleta de dados, exacerbando os desafios de monitoramento:

- Redução de 30% na frequência de coletas
- Lacunas temporais significativas nos dados
- Necessidade de interpolação estatística para manutenção das séries temporais
- Reforço da necessidade de estratégias mais resilientes para cenários adversos

6.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA E MODELAGEM

6.2.1. ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A aplicação da ANOVA permitiu uma avaliação detalhada das variações do IQA entre os diferentes pontos de coleta:

- Heterogeneidade significativa: $F = 23,47$, $p < 0,001$, confirmando diferenças significativas entre os pontos
- Ranking de qualidade: PS410 (68,2 ± 6,8) > PS415 (66,8 ± 7,9) > PS418 (64,5 ± 8,2) > ... > PS413 (54,7 ± 11,2)
- Identificação de variáveis determinantes: As variáveis locais desempenham papéis fundamentais na qualidade da água
- Grupos homogêneos: Três grupos distintos identificados com base nas pressões antrópicas

6.2.2. MODELO DE REGRESSÃO MÚLTIPLA

O modelo de Regressão Múltipla apresentou um ajuste robusto:

- R^2 ajustado: 0,79, demonstrando boa capacidade explicativa
- Variáveis mais significativas: Oxigênio dissolvido, DBO, coliformes termotolerantes e fósforo total
- Aplicabilidade: Modelo adequado para avaliação das condições da bacia e compreensão da dinâmica dos fatores influenciadores
- Subsídios para políticas: Fornece base técnica para implementação de políticas públicas de gestão hídrica

6.2.3. REDE NEURAL DE REGRESSÃO GERAL (GRNN)

A introdução de métodos preditivos através da GRNN destacou-se como um avanço promissor:

- Desempenho superior: R^2 médio de 0,84, superando métodos tradicionais
- Métricas robustas: MAE médio de 2,5, RMSE médio de 3,3, MAPE médio de 4,2%

- Variabilidade entre pontos: PS419 com melhor desempenho (R^2 = 0,91), PS413 com maior desafio (R^2 = 0,76)
- Validação bem-sucedida: Predições para 2023 validadas com erro médio inferior a 5%

6.3. CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS E TÉCNICAS

6.3.1. AVANÇOS METODOLÓGICOS

Este trabalho contribui para o avanço das metodologias de gestão de recursos hídricos através de:

- Integração de técnicas: Combinação eficaz de análise estatística tradicional com inteligência artificial
- Abordagem inovadora: Aplicação da GRNN especificamente para predição de IQA em bacias hidrográficas complexas
- Validação rigorosa: Implementação de múltiplas métricas de validação e comparação com métodos alternativos
- Aplicação prática: Desenvolvimento de metodologia aplicável a outras bacias hidrográficas

6.3.2. CONTRIBUIÇÕES PARA A GESTÃO AMBIENTAL

Os resultados oferecem subsídios técnicos e científicos valiosos:

- Tomada de decisão: Base sólida para processos decisórios relacionados ao monitoramento e conservação
- Sistemas de alerta: Desenvolvimento de sistemas de alerta precoce baseados em predições confiáveis
- Estratégias preventivas: Capacidade preditiva que incentiva ações preventivas diante da degradação
- Otimização de recursos: Direcionamento eficiente de investimentos em saneamento e controle de poluição

6.3.3. EXPERIÊNCIA PROFISSIONAL INTEGRADA

Um diferencial importante deste trabalho foi a integração entre ciência ambiental e técnicas avançadas de automação:

- Abordagem sistêmica: Incorporação de conceitos de automação industrial e controle de processos
- Precisão técnica: Rigor no tratamento dos dados baseado em experiência em instrumentação
- Otimização: Aplicação prática de conhecimentos de otimização de processos industriais
- Visão holística: Perspectiva única que combina engenharia ambiental com automação e controle

6.4. ANÁLISE DE FONTES DIFUSAS DE POLUIÇÃO

6.4.1. INFLUÊNCIA DE ATIVIDADES AGROPECUÁRIAS

O estudo considerou a influência de fontes difusas de poluição:

- Áreas de pastagem: Identificadas como fontes significativas de contaminação difusa
- Rebanhos bovinos: Contribuição substancial para alteração da qualidade da água
- Fatores antrópicos: Incorporação bem-sucedida ao modelo analítico
- Interações solo-água: Compreensão ampliada das interações entre uso do solo e saúde dos corpos hídricos

6.4.2. IMPLICAÇÕES PARA O PLANEJAMENTO

Os achados relacionados às fontes difusas têm implicações importantes:

- Zoneamento ambiental: Necessidade de revisão dos critérios de zoneamento
- Práticas agrícolas: Promoção de práticas mais sustentáveis na bacia
- Educação rural: Implementação de programas de educação ambiental rural
- Monitoramento integrado: Necessidade de monitoramento que considere todas as fontes

6.5. ALCANCE DOS OBJETIVOS

6.5.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral de analisar a evolução temporal da qualidade das águas do médio Paraíba do Sul no período de 2012 a 2022, desenvolvendo modelos preditivos baseados em redes neurais artificiais, foi plenamente alcançado:

- Análise temporal abrangente realizada com sucesso
- Modelo GRNN desenvolvido e validado
- Contribuições efetivas para estratégias de gestão sustentável identificadas
- Base técnica sólida estabelecida para tomada de decisões

6.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Objetivo 1 - Caracterização da variabilidade temporal:

- ✓Variabilidade temporal detalhadamente caracterizada nos nove pontos
- ✓Padrões sazonais identificados e quantificados
- ✓Influências de eventos extremos documentadas

Objetivo 2 - Identificação de fontes de variação:

- ✓ANOVA e análises multivariadas aplicadas com sucesso

- ✓Principais fatores de variação identificados
- ✓Importância relativa de cada parâmetro quantificada

Objetivo 3 - Avaliação de fatores sazonais:

- ✓Teste T pareado revelou padrões sazonais significativos
- ✓Impactos de eventos climáticos extremos quantificados
- ✓Seca de 2014/2015 detalhadamente analisada

Objetivo 4 - Desenvolvimento de modelos preditivos:

- ✓Modelo GRNN desenvolvido e implementado
- ✓Validação rigorosa com múltiplas métricas
- ✓Superioridade demonstrada em relação a métodos alternativos

Objetivo 5 - Proposição de diretrizes:

- ✓Diretrizes técnicas fundamentadas desenvolvidas
- ✓Recomendações para aprimoramento do monitoramento
- ✓Estratégias de gestão baseadas em evidências propostas

6.6. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

6.6.1. LIMITAÇÕES METODOLÓGICAS

- Período de análise: Embora significativo (11 anos), pode não capturar tendências de muito longo prazo
- Dados secundários: Dependência de dados coletados por terceiros pode introduzir limitações de qualidade
- Variáveis não consideradas: Algumas variáveis potencialmente relevantes podem não ter sido incluídas devido à disponibilidade
- Escala espacial: Resultados específicos para os pontos selecionados, com limitações para generalização espacial

6.6.2. LIMITAÇÕES DOS MODELOS

- Eventos extremos: Dificuldade em prever eventos não representados no histórico de treinamento
- Mudanças abruptas: Limitações para capturar mudanças súbitas nas condições da bacia
- Fatores externos: Influência de fatores não quantificados (mudanças regulamentares, novas tecnologias)
- Horizonte de predição: Confiabilidade reduzida para predições de muito longo prazo

6.7. RECOMEDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.7.1. EXTENSÕES METODOLÓGICAS

- Incorporação de dados meteorológicos: Integração de dados meteorológicos em tempo real para melhorar predições
- Modelos híbridos: Desenvolvimento de modelos que combinem GRNN com outras técnicas de IA
- Análise de séries temporais: Aplicação de técnicas específicas para séries temporais (ARIMA, LSTM)
- Modelos espaciais: Desenvolvimento de modelos que considerem explicitamente a variabilidade espacial

6.7.2. EXPANSÃO DO ESCOPO

- Extensão geográfica: Aplicação da metodologia a outras sub-bacias do Paraíba do Sul
- Novos parâmetros: Inclusão de parâmetros emergentes (micropoluentes, hormônios, microplásticos)
- Múltiplas escalas: Análise em diferentes escalas temporais (diária, semanal, mensal)
- Cenários futuros: Desenvolvimento de cenários considerando mudanças climáticas

6.7.3. APLICAÇÕES PRÁTICAS

- Sistema operacional: Desenvolvimento de sistema operacional de predição em tempo real
- Interface usuário: Criação de interfaces amigáveis para gestores e tomadores de decisão
- Integração institucional: Integração com sistemas de monitoramento existentes
- Capacitação: Programas de capacitação para operadores e gestores

6.8. IMPLICAÇÕES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS

6.8.1. GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

- Sistemas de alerta: Implementação de sistemas de alerta baseados em predições
- Priorização de investimentos: Direcionamento eficiente de recursos para pontos críticos
- Monitoramento otimizado: Otimização da rede de monitoramento baseada em evidências

- Gestão adaptativa: Implementação de estratégias de gestão adaptativa

6.8.2. CONTROLE DE POLUIÇÃO

- Licenciamento ambiental: Critérios mais rigorosos para empreendimentos em áreas críticas
- Fiscalização dirigida: Focalização da fiscalização em períodos e locais de maior risco
- Incentivos econômicos: Desenvolvimento de instrumentos econômicos para controle de poluição
- Educação ambiental: Programas específicos para diferentes públicos-alvo

6.9. CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

6.9.1. OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

Este trabalho contribui diretamente para vários ODS:

- ODS 6 (Água e saneamento): Melhoria da gestão de recursos hídricos
- ODS 3 (Saúde e bem-estar): Redução de riscos à saúde pública
- ODS 11 (Cidades sustentáveis): Gestão sustentável de recursos urbanos
- ODS 15 (Vida terrestre): Proteção de ecossistemas aquáticos

6.9.2. INOVAÇÃO E TECNOLOGIA

- Transferência de tecnologia: Metodologia transferível para outras regiões
- Capacitação técnica: Formação de recursos humanos especializados
- Parcerias institucionais: Fortalecimento de parcerias entre academia e gestão pública
- Inovação aberta: Disponibilização de código e metodologias para a comunidade científica

6.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa avança significativamente em termos metodológicos ao combinar modelagem estatística tradicional com técnicas modernas de inteligência artificial, especificamente redes neurais de regressão generalizada. A integração bem-sucedida dessas abordagens resultou em um modelo robusto e confiável para predição da qualidade da água, validado através de múltiplas métricas e comparado com métodos alternativos.

Além da contribuição técnica, esta pesquisa oferece soluções práticas para a gestão e recuperação de ecossistemas aquáticos em uma das bacias hidrográficas mais importantes do Brasil. Os resultados demonstram que é possível desenvolver ferramentas preditivas confiáveis que apoiem a tomada de decisão em gestão

ambiental, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e a proteção dos recursos hídricos.

A experiência profissional do autor em automação industrial e sistemas de controle agregou uma perspectiva única ao trabalho, resultando em uma abordagem sistemática e rigorosa que pode ser replicada em outras bacias hidrográficas. A verificação das premissas estatísticas por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett reforça a robustez da abordagem adotada.

Portanto, este estudo contribui significativamente para o avanço das metodologias de gestão de recursos hídricos [33, 3], oferecendo subsídios técnicos e científicos para a tomada de decisão em políticas públicas e estratégias de monitoramento ambiental mais proativas, eficazes e sustentáveis. A metodologia desenvolvida representa um passo importante na direção de uma gestão mais inteligente e baseada em evidências dos recursos hídricos brasileiros.

REFERÊNCIAS

[1] H. Cacete, M. F. A. Durães e G. J. H. Moura. «Análise da qualidade da água do Rio Paraíba do Sul: uma revisão sistemática». Em: *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 26 (2021), e15.

[2] C. G. Massone et al. «Water quality assessment of the Paraíba do Sul River basin using multivariate statistical analysis». Em: *Environmental Monitoring and Assessment* 195.3 (2023), pp. 1–18.

[3] J. G. Tundisi e T. Matsumura-Tundisi. *Recursos hídricos no século XXI*. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

[4] M. Von Sperling. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

[5] H. Wang et al. «A review of the applications of artificial neural networks in surface water quality modeling». Em: *Environmental Sciences Europe* 30.1 (2018), pp. 1– 13.

[6] J. Chen et al. «Machine learning techniques for water quality prediction: a review». Em: *Water Research* 195 (2021), p. 116984.

[7] A. Bagherzadeh et al. «Prediction of water quality parameters using machine learning models: a comprehensive review». Em: *Environmental Science and Pollution Research* 30.12 (2023), pp. 32176–32201.

[8] T. Shafighfard et al. «Machine learning and statistical approaches for predicting water quality parameters: A comprehensive review». Em: *Journal of Environmental Management* 350 (2024), p. 119651.

[9] J. M. A. Castro. «Regime jurídico das águas no Brasil». Em: *Revista do Ministério Público do RS* 65 (2010), pp. 29–36.

[10] BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil*. Diário Oficial da União. Disponível em: https:/ / www .planalto.gov .br / ccivil_03 / Constituicao/ Constituicao.htm. Brasília, DF, 1988.

[11] BRASIL. *Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos*. Diário Oficial da União. Disponível em: https://www.planalto. gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Brasília, DF, 1997.

[12] BRASIL. *Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente*. Diário Oficial da União. Disponível em: https://www.planalto. gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm. Brasília, DF, 1981.

[13] BRASIL. *Decreto nº 50.877, de 29 de junho de 1961. Define legalmente a poluição hídrica*. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 1961.

[14] BRASIL. *Decreto-Lei nº 221, de 28 de fevereiro de 1967. Dispõe sobre a proteção e estímulos à pesca*. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 1967.

[15] BRASIL. *Decreto nº 73.030, de 30 de outubro de 1973. Cria a Secretaria Especial do Meio Ambiente*. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 1973.

[16] BRASIL. *Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente*. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 1998.

[17] BRASIL. *Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Decreta o Código de Águas*. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 1934.

[18] BRASIL. *Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o*

saneamento básico. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 2007.

[19] BRASIL. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 2010.

[20] BRASIL. *Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento*. Brasília, 2005.

[21] BRASIL. *Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas*. Diário Oficial da União. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9984.htm. Brasília, DF, 2000.

[22] BRASIL. *Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico*. Diário Oficial da União. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Brasília, DF, 2020.

[23] ONU. *Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Organização das Nações Unidas. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6. Nova York, 2015.

[24] INEA. *Boletim de Qualidade das Águas da Região Hidrográfica II - Paraíba do Sul*. Rel. téc. Rio de Janeiro: Instituto Estadual do Ambiente, 2022.

[25] INEA. *Qualidade das águas superficiais do Estado do Rio de Janeiro: relatório anual 2021*. Rel. téc. Rio de Janeiro: Instituto Estadual do Ambiente, 2022.

[26] APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23ª ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2017.

[27] J. P. S. Valente, P. M. Padilha e A. M. M. Silva. «Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de avaliação da qualidade da água». Em: *Eclética Química* 22 (1997), pp. 49–66.

[28] R. G. Wetzel. *Limnology: lake and river ecosystems*. 3ª ed. San Diego: Academic Press, 2001.

[29] S. C. Oliveira et al. «Water quality index as a simple indicator of aquaculture effects on aquatic bodies». Em: *Ecological Indicators* 12.1 (2012), pp. 077–081.

[30] H. A. Q. Palácio et al. «Índice de qualidade da água de reservatórios em região semiárida». Em: *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 13.6 (2009), pp. 864–872.

[31] M. J. Blanca et al. «Non-normal data: Is ANOVA still a valid option?» Em: *Psicothema* 29.4 (2017), pp. 552–557.

[32] M. Kozak e H. P. Piepho. «What's normal anyway? Residual plots are more telling than significance tests when checking ANOVA assumptions». Em: *Journal of Agronomy and Crop Science* 204.1 (2018), pp. 86–98.

[33] M. F. A. Porto e R. L. L. Porto. «Gestão de bacias hidrográficas». Em: *Estudos Avançados* 22.63 (2008), pp. 43–60.

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

@editorapoisson

https://www.facebook.com/editorapoisson